

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINA MONTEIRO RODRIGUES

**Avaliação do uso de resíduo de beneficiamento de rochas em matrizes de
concreto: análise das propriedades físicas e mecânicas**

São Leopoldo
2022

ANA CAROLINA MONTEIRO RODRIGUES

Avaliação do uso de resíduo de beneficiamento de rochas em matrizes de concreto: análise das propriedades físicas e mecânicas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por ter a oportunidade de ter chego até esse momento da minha vida, além de ser eternamente grata por todas as pessoas que fazem parte da minha vida e da minha trajetória.

Um agradecimento muito especial e com todo o meu amor para a minha avó, Sônia Maria Monteiro que foi uma das pessoas que mais torceu e esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida e, em especial, na minha trajetória acadêmica, sempre me incentivando e vibrando todas as minhas conquistas, além de nunca ter medido esforços para que o dia de hoje estivesse acontecendo.

A minha mãe, Ângela Viviane Monteiro Rodrigues, que sempre esteve comigo, nos momentos de aflição e nervoso dando sempre um jeito de me tranquilizar e me fazendo ver que tudo, no final, daria certo. Juntamente agradeço ao meu pai, Flamarion Rodrigues, por todo apoio, compreensão e ajuda com os materiais do estudo nessa reta final. Aos dois, meu muito obrigada por tudo sempre e por nunca desistirem de mim.

Aos meus avôs, Ostidor Oscar Monteiro e Luiz Carlos Rodrigues por se fazerem presentes de onde estiverem em todos os meus momentos de angústia e apreensão. Eu tenho a plena convicção de que vocês estão sempre ao meu lado e torcendo para o meu bem. Tenho certeza que hoje seriam uma das pessoas que mais estariam vibrando a essa conquista comigo.

A toda a minha família: vó, tios, primos e bisa por estarem sempre presentes e torcendo por mim. Ao meu namorado, Alisson Chies, por sempre estar presente do meu lado e sempre me ouvir nos piores momentos.

A minha dupla de faculdade e para a vida toda, Talia dos Santos Corrêa, por ter me acompanhado nesses seis anos e meio, desde o primeiro semestre até o último dia de faculdade. Obrigada por todos os momentos compartilhados, por todos os momentos de aflição, de felicidade e por nunca ter largado a minha mão em todas as fases da graduação.

As minhas amigas Stéphanie Lassen Wink e Raysa Garcia por estarem sempre ao meu lado, me ouvindo e aconselhando nos momentos de dificuldade, por me acompanharem, ainda mais de perto, nessa reta final e estarem sempre presentes na minha vida.

A todos os professores que tive o prazer de conhecer e que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, o meu muito obrigada.

Aos laboratoristas do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Unisinos pela ajuda na realização dos ensaios e ensinamentos.

A todos os colegas que tive o prazer de conhecer ao decorrer da graduação e que dividiram comigo seus conhecimentos.

A empresa Donadello por ter doado o resíduo utilizado para a realização deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço de coração a minha orientadora Fernanda Pacheco que, além de minha professora é um exemplo que sempre vou levar para a vida profissional. Muito obrigada por todos os ensinamentos, tanto ao longo do curso, quanto ao longo desse um ano para a desenvolvimento desse estudo. Muito obrigada pela ajuda e por ter acreditado no meu potencial para realizar esse trabalho.

RESUMO

Atualmente, há uma grande preocupação da sociedade em geral em relação ao meio ambiente e a utilização dos recursos naturais. A construção civil está se tornando um dos setores mais prejudiciais quando se trata desse assunto, pois o volume de resíduos gerados é muito alto e, por muitas vezes, o descarte é feito de maneira imprópria. Sendo assim, a reciclagem e a reutilização desses resíduos tem sido um grande nicho de viabilidade para estudos que possuem o objetivo de minimizar cada vez mais os impactos gerados. Os sedimentos advindos do beneficiamento de rochas é um dos nichos que possui maior produção de resíduos no Brasil, devido a sua volumosa demanda de consumo. Nesse contexto, como o setor da construção civil está em crescente ascendência e é uma das maiores fontes de rendas, então, estimula-se o uso dos resíduos gerados por ela como um novo ciclo de reutilização e, conseqüentemente, reduzir os impactos que essas matérias primas geram no meio ambiente. Tendo em vista essa questão, o trabalho que segue tem como objetivo, analisar as possíveis contribuições para as propriedades mecânicas e físicas que os resíduos de beneficiamento de rochas podem vir a ter quando substituído cimento por resíduo em um concreto convencional. É de suma importância verificar os comportamentos físicos e mecânicos do concreto com a substituição do resíduo para a análise das contribuições que ele tem a oferecer. Para isso, foram executados ensaios de resistência mecânica à compressão, índices físicos e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas a fim de se obter comparações perceptíveis do comportamento de um concreto com adição de resíduos de beneficiamento de rochas e um concreto convencional. Os resultados obtidos indicam que concretos com mais de 15% de substituição apresentaram impacto nas propriedades e não contribuem para a resistência à compressão do concreto. Entretanto, os resultados de 5% e 10% se mantiveram semelhantes, apresentando diferenças de 8,0%, 4,6%, 6,0% e 8,0% nas idades de 7, 19, 28 e 56 dias de idade do concreto. Para os índices físicos, os resultados decresceram à medida que foi substituído cimento por resíduo estando diretamente relacionados com os valores obtidos para os ensaios de resistividade elétrica e propagação de ondas ultrassônicas. Percebe-se assim, que há possibilidade de inserção do resíduo, com pequenos impactos nas matrizes.

Palavras-chave: construção civil; concreto; resíduos; resíduos da construção civil; propriedades físicas; propriedades mecânicas; beneficiamento de rochas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grau de impacto de diferentes tendências nas atividades da construção civil	17
Figura 2 - Esquema dos processos de mineração	19
Figura 3 - Gráfico da geração de resíduos por habitante x país	19
Figura 4 - Gráfico de geração de resíduos, crescimento do PIB e populacional	20
Figura 5 - RCC coletado nas regiões do Brasil em (t/dia)	22
Figura 6 - Gráficos de comparações anuais de geração de resíduos no Brasil	23
Figura 7 - Gráficos de comparações anuais de geração de resíduos por regiões do país	24
Figura 8 - Quadro de Consumo de Cimento nas Regiões do Brasil.....	31
Figura 9 – Processo de produção do Cimento	33
Figura 10 – Exportações Mundiais em faturamento	34
Figura 11 - Taxas de variação do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais.....	35
Figura 12 - Estrutura produtiva e de comercialização das rochas ornamentais	37
Figura 13 – Método de pesquisa do estudo	44
Figura 14 – Empresa responsável pela doação do resíduo	49
Figura 15 – Condições do resíduo no dia da coleta	50
Figura 16 – Imagens dos corpos de prova concretados.....	52
Figura 17 – Ensaio de compressão dos corpos de prova	55
Figura 18 – Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos de prova ..	56
Figura 19 – Ensaio de resistividade elétrica nos corpos de prova	56
Figura 20 – Resultado dos ensaios de abatimento dos quatro traços.....	60
Figura 21 – Representação da Zona de Transição do Concreto.....	64

LISTA DE ABREVIações

A/A	Relação água/aglomerante
A/C	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira Normas Técnicas
ABRELP	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BET	Ensaio de Área Superficial
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CERF	Civil Engineering Research Foundation
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
FRX	Florescência de Raio X
IBGE	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
NBR	Norma Brasileira
OCDE	Organization for Economic Co-Corporation and Development
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantificação de resíduos gerados nos países.....	21
Tabela 2 – Meta 1 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	25
Tabela 3 – Meta 2 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	25
Tabela 4 – Meta 3 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	25
Tabela 5 – Meta 4 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	26
Tabela 6 – Meta 5 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	26
Tabela 7 – Meta 6 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.....	27
Tabela 8 – Classificação dos resíduos segundo o CONAMA.....	28
Tabela 9 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagens de massa) ..	29
Tabela 10 - Produção de rochas ornamentais por regiões no Brasil em 2015	35
Tabela 11 – Estudos com a utilização de Resíduos de Beneficiamento de Rochas .	41
Tabela 12 – Resultados obtidos do ensaio de raio – X (FRX).....	45
Tabela 13 - Resultados de massa unitária, massa específica saturada superfície seca e absorção do agregado miúdo	46
Tabela 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	47
Tabela 15 - Massa unitária, massa específica saturada superfície seca e agregado seco e absorção do agregado graúdo	48
Tabela 16 – Distribuição Granulométrica do Agregado Graúdo	48
Tabela 17 – Nomenclatura e definição dos traços	52
Tabela 18 – Composição dos traços para moldagem dos corpos de prova	52
Tabela 19 – Composição e Quantificação do Resíduo (resultados ensaio de FRX) .	58
Tabela 20 – Resultados obtidos após ensaio de abatimento	60
Tabela 21 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão	61
Tabela 22 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas: qualidade do concreto segundo IS 13311-92 e Cánovas (1998)	66
Tabela 24 – Síntese de resultados obtidos aos 56 dias	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Cimento.....	45
Gráfico 2 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	47
Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	49
Gráfico 4 – Curva Granulométrica do Resíduo.....	58
Gráfico 5 – Resultado do Ensaio de Compressão dos Quatro Traços	63
Gráfico 6 – Resultados do Ensaio de Propagação de Ondas Ultrassônicas	65
Gráfico 7 – Resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica.....	67
Gráfico 8 – Resultados do Ensaio de Absorção Total de Água.....	69
Gráfico 9 – Absorção de água e qualidade do concreto de acordo com critérios da CEB 192 (1989).....	70
Gráfico 10 – Resultado do Ensaio de Índice de Vazios.....	71
Gráfico 11 – Resultados do Ensaio de Massa Específica Real.....	72
Gráfico 12 – Resultados do Ensaio de Absorção por Capilaridade.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	14
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3 PROBLEMA	14
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo geral	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
1.5 JUSTIFICATIVA	15
2 INSERÇÃO DE RESÍDUOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	17
2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTO AMBIENTAL	17
2.1.1 Potencial Poluidor da indústria	18
2.1.2 Geração de resíduos	19
2.2 RESÍDUOS NO BRASIL.....	21
2.3 PRODUÇÃO DE CONCRETOS	28
2.3.1 Cimento Portland	28
2.3.2 Tipos de Cimento Portland	29
2.3.3 Consumo de Cimento Portland	30
2.3.3.1 Cimento Portland no mundo	30
2.3.3.2 Consumo de Cimento Portland no Brasil.....	31
2.4 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	32
2.5 PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	33
2.5.1 Cadeia produtiva do setor das rochas ornamentais	37
2.5.1.1 Etapa de Lavra	38
2.5.1.2 Etapa de Beneficiamento Primário	39
2.5.1.3 Etapa de Marmoraria.....	39
2.6 TIPO E VOLUME DE RESÍDUO GERADO PELAS ROCHAS ORNAMENTAIS	39
2.7 USO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CONCRETOS	40
3 METODOLOGIA	44
3.1 MATERIAIS	44
3.1.1 Cimento	44
3.1.2 Agregados graúdo e miúdo	46
3.1.3 Resíduo	49

3.1.4 Aditivo	50
3.2 MÉTODOS DE ENSAIO	50
3.2.1 Escolha do traço utilizado	51
3.2.2 Implementação e execução do concreto.....	51
3.2.3 Ensaio de caracterização.....	53
3.2.3.1 Granulometria.....	53
3.2.3.2 Massa específica.....	53
3.2.3.3 Massa unitária	53
3.2.3.4 Fluorescência de raios – X.....	53
3.2.3.5 Área Superficial por BET- Brunauer, Emmett e Teller	54
3.2.4 Ensaio no estado fresco	54
3.2.4.1 Determinação da consistência.....	54
3.2.5 Ensaio no estado endurecido.....	54
3.2.5.1 Resistência mecânica à compressão	54
3.2.5.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	55
3.2.5.3 Determinação da resistividade elétrica.....	56
3.2.5.4 Ensaio de absorção total de água, índice de vazios e massa específica real	57
3.2.5.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade	57
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	58
4.2 ESTADO FRESCO.....	59
4.2.1 Determinação da consistência – abatimento	59
4.3 ESTADO ENDURECIDO.....	61
4.3.1 Resistência à Compressão	61
4.3.2 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas	65
4.3.3 Resistividade Elétrica	67
4.3.4 Absorção Total de Água, Índice de Vazios e Massa Específica Real	68
4.3.4.1 Absorção Total de Água	68
4.3.4.2 Índice de Vazios	70
4.3.4.3 Massa Específica Real	71
4.3.5 Absorção de Água por Capilaridade.....	73
4.3.5 Compilado dos Resultados	74

576
CONSIDERAÇÕES FINAIS76
REFERÊNCIAS.....78

1 INTRODUÇÃO

A construção civil vem mostrando um grande crescimento na economia do país se comparado a períodos anteriores. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o produto interno bruto (PIB) relacionado a construção teve um aumento de cerca de 2,1% no primeiro trimestre de 2021 se comparado ao quarto trimestre de 2020. Mesmo com todos os problemas acarretados pela pandemia no Brasil, atualmente, a construção civil foi o setor que mais gerou empregos de carteiras assinadas, cerca de 105.248 novas vagas segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC).

Apesar de ser um dos setores que mais fomenta a economia, há, por outro lado, um problema que diz respeito ao consumo de materiais e aos resíduos que o setor acaba gerando, afetando, diretamente, o meio ambiente. Tanto o descarte incorreto dos materiais quanto a produção e extração errada de determinadas matérias primas fundamentais para o setor, são, segundo Mesquita (2012), um dos principais problemas que afetam o meio ambiente.

Os resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais têm tido um grande crescimento se comparado as décadas iniciais de produção. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, o Brasil encontra-se em quinto lugar no ranking de produção e exportação de rochas ornamentais no ano de 2017, atrás somente da China, Índia, Turquia e Irã. Atualmente, é conhecido como um país com uma grande “geodiversidade” pela sua forte comercialização internacional. Além disso, é um dos grandes contribuintes para a geração de resíduos sólidos. Em 2017, foram gerados cerca de 9,24Mt de resíduos derivados de rochas ornamentais, sendo 1,046Mt gerados para exportação. Aproximadamente 41% do volume dos blocos é transformado em rejeito, em torno de 3,36Mt são produzidos de materiais para serem descartados durante o processamento das rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2017).

A inserção do resíduo na produção de concreto, segundo Degen et al (2013), é viável e não altera as propriedades mecânicas e, para determinadas proporções, não interfere no desempenho dos concretos.

1.1 TEMA

Este estudo teve como ideia inicial a abordagem prática da utilização de um resíduo beneficiário de rochas ornamentais para a execução de matrizes de concreto. Atualmente, principalmente a construção civil, em todos os seus ramos, tem gerado muitos resíduos e, com isso, comprometendo o meio ambiente, o tema desse trabalho vem a encontro disso.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esse trabalho está delimitado em analisar e abordar apenas um tipo de resíduo benéfico de rochas ornamentais através de um estudo prático, adicionando-o em matrizes cimentícias e verificando o seu comportamento quando misturado as propriedades de um concreto. As propriedades analisadas são mecânicas e físicas, para análise de viabilidade de incorporação do resíduo.

1.3 PROBLEMA

É possível inserir resíduos do setor de beneficiamento de rochas em elementos de concreto e obter materiais com características físicas e mecânicas compatíveis com o seu uso a partir da substituição do cimento pelo resíduo?

1.4 OBJETIVOS

Esse trabalho divide-se em objetivos gerais e específicos, conforme segue.

1.4.1 Objetivo geral

Realizar um comparativo entre um concreto convencional e outros com a substituição do cimento pelo resíduo nos teores de 5, 10 e 15% a partir de ensaios físicos e mecânicos.

1.4.2 Objetivos específicos

O trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Caracterizar as propriedades e origem do resíduo;
- b) Analisar a possibilidade de inserção do resíduo em matrizes cimentícias através de um estudo prático de sua resistência à compressão, considerando os teores de uso de 5%, 10% e 15% do resíduo;
- c) Analisar pelos ensaios físicos o impacto da incorporação dos resíduos em concretos.

1.5 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem como ideia principal minimizar os impactos dos resíduos gerados pela construção civil no meio ambiente. Segundo Gou, Zhou e Then (2019), a mineração, os processamentos e processos metalúrgicos geram cada vez mais resíduos sólidos como resíduos do beneficiamento de rochas, escórias e rejeitos. Uma das grandes vantagens que o ramo da construção possui é poder utilizar de variados resíduos sólidos industriais na composição das matrizes cimentícias (GOU, ZHOU E THEN, 2019), visando reduzir os impactos gerados e descobrir novos componentes que auxiliam para uma melhoria das propriedades dos concretos.

Atualmente, o Brasil é um dos grandes produtores de resíduos e dentro dos setores das indústrias, o da construção civil é considerado um dos maiores geradores de resíduos prejudiciais ao meio ambiente com um crescimento de 5,5% na geração de resíduos entre os anos de 2020 e 2021, pois, muitas vezes são descartados incorretamente ou nem mesmo há um lugar para serem direcionados corretamente (ABRELPE, 2021). Tendo em vista esse problema e a ideia de redução dessa produção, foi escolhido um dos setores que contribuem para uma boa parte dessa geração, o das rochas ornamentais e, com isso, utilizar dos resíduos finos produzidos para analisar seu comportamento quando entra em contato com a areia, brita e cimento para a formação do concreto. Visando a redução de resíduos para o meio ambiente e a contribuição do mesmo para as propriedades físicas e mecânicas do concreto.

A utilização de uma certa quantidade de resíduo de beneficiamento de rochas pode contribuir para uma resistência maior do concreto e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas dele (QIU et al, 2020). Segundo o estudo realizado em dezesseis corpos de prova, com diferentes traços e porcentagens de adição do resíduo de 25%, 30%, 35% e 40% é possível substituir os agregados

convencionais por resíduos de beneficiamento de rochas, para obter-se uma boa resistência do concreto. Ainda segundo Qiu et al (2020), a relação água/cimento e a adição de resíduos de beneficiamento de rochas possuem um impacto significativo no resultado do concreto pois quando a quantidade de cimento se mantém a mesma e a quantidade de resíduo aumenta, a área da superfície específica do corpo diminui e a distribuição de cimento por unidade de área aumenta o que faz com que, conseqüentemente, a resistência do concreto eleve.

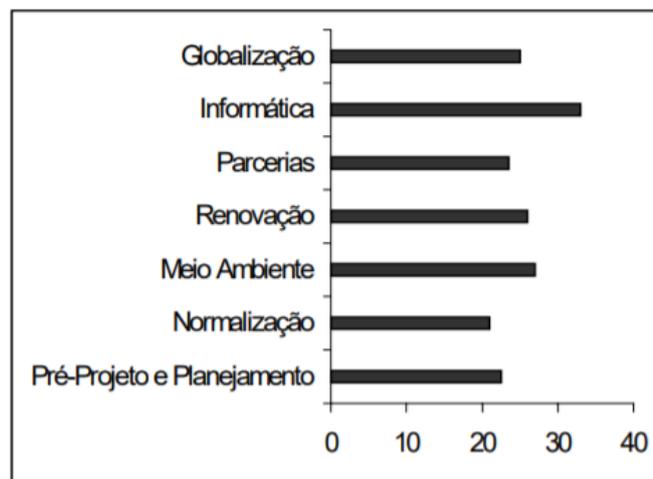
2 INSERÇÃO DE RESÍDUOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E IMPACTO AMBIENTAL

Ao decorrer dos anos, a construção civil vem sendo um dos principais setores da indústria que gera um grande impacto ambiental por conta de toda a sua geração de resíduos e descarte final. Segundo Pimentel et. al. (2007), a construção civil é uma grande exploradora de recursos naturais e, conseqüentemente, a sua produção e acúmulo de lixo gera poluição e descartes inadequados, além de diversos problemas ambientais.

Segundo uma pesquisa que tem em vista as tendências da construção civil para o futuro feita pela *Civil Engineering Research Foundation* (CERF) com cerca de 1500 pessoas, sendo elas do ramo da construção civil de todo o mundo (construtores, projetistas e pesquisadores), o tema “meio ambiente” foi o segundo mais votado segundo a Figura 1 que segue. Tendo-se notado que ficou atrás apenas do item “informática”, ou seja, a relevância do assunto dos impactos e do meio ambiente são assuntos de extrema preocupação e importância.

Figura 1 - Grau de impacto de diferentes tendências nas atividades da construção civil



Fonte: BERNTEIN (S/D) apud JOHN, 1999

Tendo em vista essa grande geração de resíduos acometida pela área da construção, nos últimos anos, tem-se pensado em meios de reciclagem e reutilização desses resíduos, visando uma redução nos impactos ambientais e,

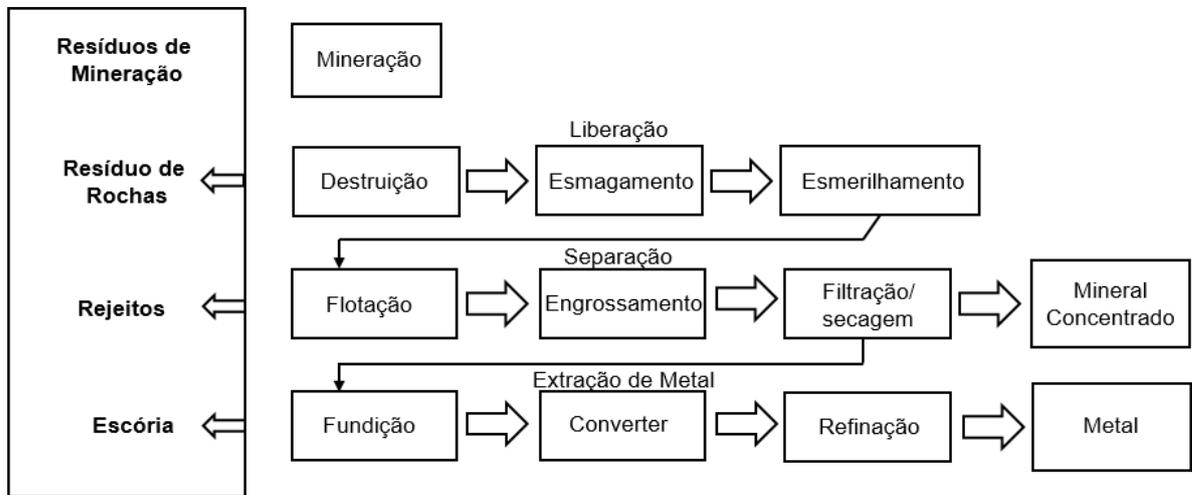
consequentemente, trazer benefícios tanto na redução do consumo de recursos naturais não renováveis, quanto nas áreas de aterro e utilização de energia durante os processos (JOHN, 2000 apud MIRANDA, GIULIANO, 2017). A produção mundial de concreto vem aumentando constantemente se comparado a períodos anteriores, é estimada a produção de cerca de 10 bilhões de metros cúbicos de concreto em todo o mundo e isso faz com que cresçam os estudos e análises para a inserção de resíduos sólidos de reciclagem ou reutilização (GOU, ZHOU E THEN, 2019).

2.1.1 Potencial Poluidor da indústria

Segundo Fidelis (2012), os resíduos industriais gerados vêm sendo destinados de maneira incorreta no Brasil, sendo, muitas vezes, descartados sem separação. As atividades que vem gerando cada vez mais resíduos dentro do ramo da indústria, por exemplo na parte da mineração, metalúrgica, química, celular. Essas atividades, por sua vez, geram resíduos muito variados, sendo representados em diversas categorias: resíduos de processo, de operação de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, resíduos de purificação de matérias-primas, madeiras, fibras, borrachas, escórias e cerâmicas. Tendo em vista a dificuldade de separação desses resíduos, um dos grandes desafios dos órgãos de proteção ao meio ambiente é estimular uma mudança nas empresas em relação a devida separação e destinação final.

A indústria da mineração é fundamental para o desenvolvimento das atividades humanas e da sociedade em um contexto geral. Os processos de mineração e metalúrgica geram, cada dia mais, resíduos sólidos, podendo nomeá-los em resíduos de beneficiamento de rochas, rejeitos e escórias. A Figura 2 representa um esquema dos processos.

Figura 2 - Esquema dos processos de mineração



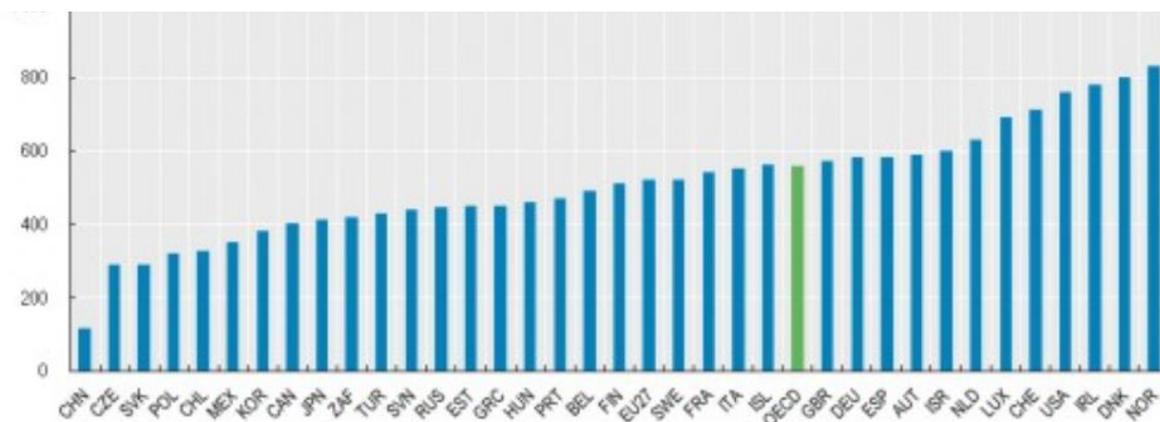
Fonte: Utilization of tailings in cement and concrete: A review, 2019 (página 1)

Conforme se percebe pela referida Figura, os resíduos das rochas ainda se desdobram após os tratamentos específicos em rejeitos e escória.

2.1.2 Geração de resíduos

A geração de resíduo é um tema mundialmente analisado e discutido na atualidade. Um estudo feito pela *Organization for Economic Co-corporation and Development* – OCDE relata a geração de resíduos sólidos de 34 países, desde os países desenvolvidos até os emergentes como a África do Sul, China e Rússia. Países como Noruega e Estados Unidos se destacam como os maiores gerados de resíduos. A Figura 3 relata a geração per capita de resíduos sólidos em kg/habitante/ano.

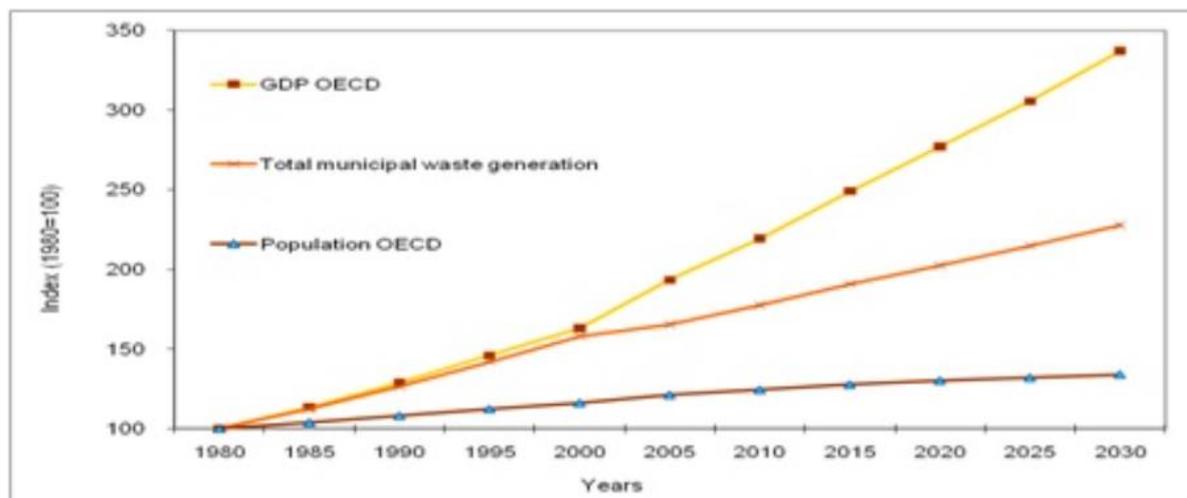
Figura 3 - Gráfico da geração de resíduos por habitante x país



Fonte: Metro apud OCDE (2009)

No gráfico a seguir, ilustra-se a geração de resíduos, juntamente com o crescimento aproximado do PIB e da população dos países da Figura 3.

Figura 4 - Gráfico de geração de resíduos, crescimento do PIB e populacional



Fonte: Metro apud OCDE (2010)

Segundo Lauritzen (1998) e Tarring (1998), ambos citados por Leite (2001), são gerados, aproximadamente, de 2 a 3 bilhões de toneladas por ano de resíduos da construção civil no mundo. Essa quantidade de resíduos pode ser comparada com a quantidade gerada de resíduos domiciliares, podendo ser, ainda, igual ou maior (JOHN, 2000).

Miller (2021) cita que se pode estimar que um terço do resíduo gerado no mundo decorre da construção civil, sendo também o setor responsável por 40% das emissões de carbono, e assim, de grande impacto ao meio ambiente.

Os países desenvolvidos ou em fase de desenvolvimento podem ser considerados aqueles que mais geram resíduos. Possuem um alto consumo de quantidade de materiais para suprir a execuções das diversas obras que acontecem e, conseqüentemente, quanto mais utilização de matérias primas, mais resíduos serão gerados e maior o impacto no meio ambiente (JOHN, 1996).

A Tabela 1 tem como objetivo relatar as quantidades aproximadas de resíduos da construção civil gerados em alguns países em comparação ao Brasil.

Tabela 1 – Quantificação de resíduos gerados nos países

Quantidade Anual			
País	Milhões t/ano	Kg/hab.ano	Fonte
Suécia	1,2 - 6	136 – 680	Tolstoy, Borklund, Carlson (1998); EU (1999)
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1300	Lauritzen (1998); Brossink, Brouwers e Van Kessel (1996); EU (1999);
EUA	136 – 171	463 – 584	EPA (1998); Peng, Grosskopf, Kibert (1994);
UK	50 – 70	880 – 1120	Detr (1998); Lauritzen (1998);
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359	Lauritzen (1998); EU (1999);
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2010	
Itália	35 – 40	600 – 690	
Alemanha	79 – 300	963 – 3658	
Japão	99	785	Kasai (1998)
Portugal	3,2 – 4,4	325 – 447	EU (1999); Ruivo e Velga (apud MARQUES NETO, 2009)
Brasil	31	230 – 760	ABRELPE (2011); Pinto (1999); Carneiro et al (2001); Pinto e Gonçalvez (2005)

Fonte: Adaptador de Córdoba (2010) apud Fernandez (2011)

Como percebe-se, em comparação com outras nações, o Brasil encontra-se em sétimo lugar como país mais gerador de resíduos dentre os onze citados. Alemanha, Estados Unidos e Japão são considerados os que mais geram impactos no ambiente, já o Brasil geral em torno de 31 milhões de t/ano de resíduos e cerca de 230 a 760 kg/hab.ano.

2.2 RESÍDUOS NO BRASIL

Com o grande crescimento populacional que existe atualmente, uma das áreas que mais cresce, conseqüentemente, é a construção civil, tanto pela construção de mais moradias quanto pelas oportunidades de emprego que tendem a elevar com a maior demanda. Segundo o Informativo Econômico do CBIC, 2022, o setor da construção civil gerou cerca de 9,10% a mais de vagas de emprego entre os meses

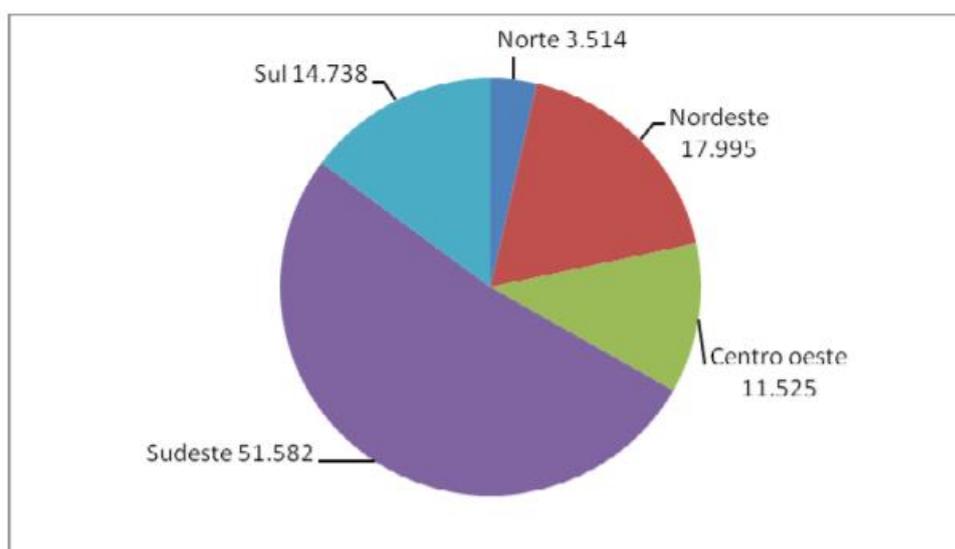
de janeiro e fevereiro desse ano. Os meses iniciais de 2022, obtiveram um melhor desempenho nesse quesito se comparado aos 12 meses anteriores.

Juntamente com esses aspectos, há, também, a questão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) que vem sendo uma das principais pautas no Brasil recentemente. Segundo Marques Neto (2005), a geração de RCC tem representado cerca de 51% a 70% dos resíduos sólidos urbanos coletados e a maioria deles representam solos e agregados naturais (Ministério do Meio Ambiente, Ministério das Cidades, 2005).

Os resíduos da Construção Civil, de maneira geral, geram um grande impacto ambiental devido ao seu extenso volume e, por muitas vezes, acumularem produtos químicos, tóxicos e materiais orgânicos que podem acumular água e, conseqüentemente, ocasionar a proliferação de doenças. Mesmo levando em consideração esses pontos, os RCCs ainda são conceituados como resíduos de baixa periculosidade (KARPINSK et al. 2009).

Em 2010, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, realizou um levantamento em diferentes partes do Brasil para averiguar a quantidade de coleta de RCC naquele ano. Sendo estimada cerca de 99354 t/dia de resíduos gerados no país. A Figura 6 ilustra os resultados encontrados, sendo a região Sudeste a maior produtora.

Figura 5 - RCC coletado nas regiões do Brasil em (t/dia)

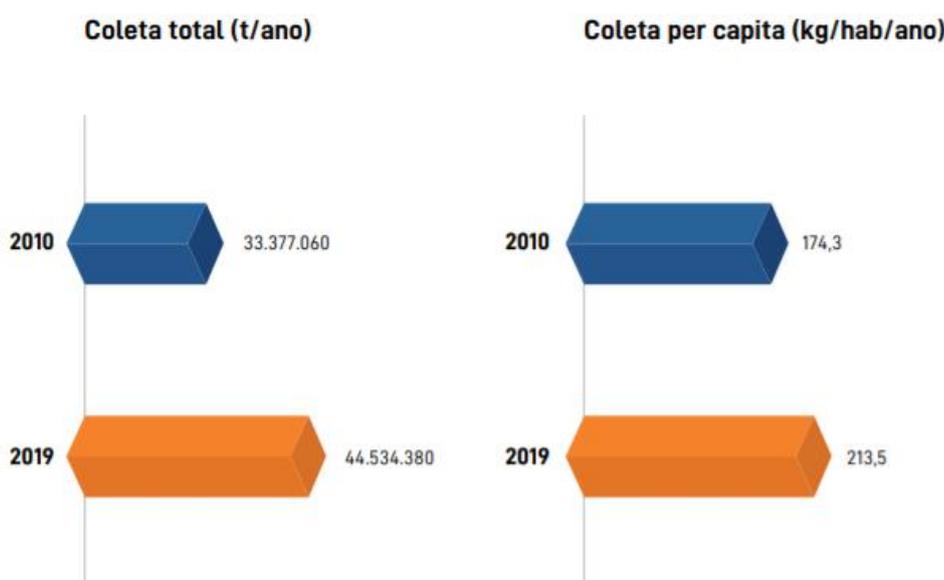


Fonte: ABRELPE (2011)

Além disso, com base nos dados 2008, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, fez uma relação entre os municípios do país em relação aos meios de coleta dos RCC, sendo eles por meios próprios, terceirizados ou ainda os municípios que cobram para executar esse serviço. Os dados obtidos foram de 7.365.566,51 t/ano coletados de origem privada e 7.192.372,71 t/ano advindos de origem pública, sem contar que essas quantidades não contabilizam o total de resíduos gerados no ano (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2010).

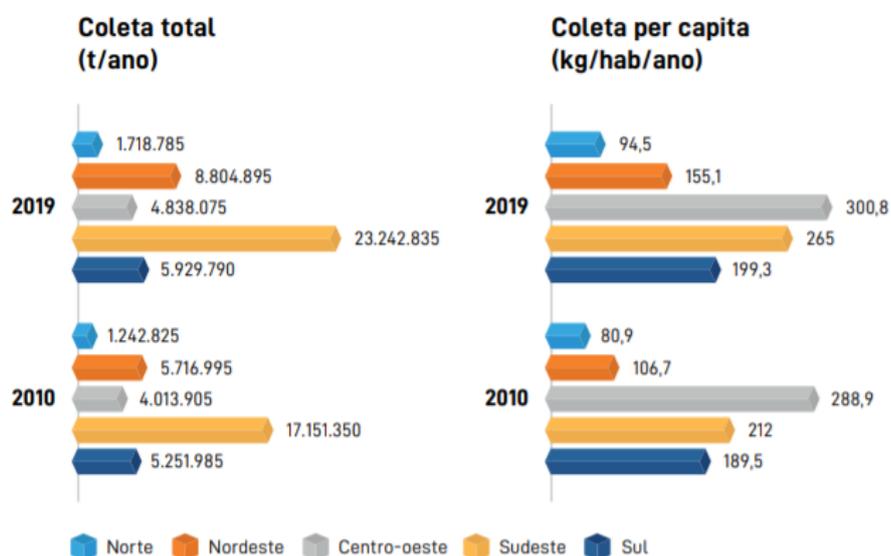
Já no ano de 2020, os resíduos coletados registraram um aumento significativo de cerca de 19% se comparado com anos atrás. O período de análise e comparação foi de 2010 a 2019, passando de 33 milhões de toneladas para 44,5 milhões de toneladas, respectivamente. A quantidade coletada per capita passou de 174,3 kg em 2010 para 213,5 kg por habitante em 2019. Os gráficos abaixo ilustram os dados obtidos nessa comparação. A região sul é a terceira maior produtora de resíduos, estando atrás apenas das regiões centro-oeste e sudeste. Seus números são de 199,3 kg/hab dia no ano de 2019 e um total de 5.929.790 toneladas por ano de resíduos gerados (ABRELPE, 2020).

Figura 6 - Gráficos de comparações anuais de geração de resíduos no Brasil



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020 – Abrelpe (página 24)

Figura 7 - Gráficos de comparações anuais de geração de resíduos por regiões do país



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020 – Abrelpe (página 24)

No ano de 2020, o aumento em relação a geração de resíduos em âmbito nacional cresceu cerca de 5,5% se comparado ao ano anterior. A região sudeste seguiu se destacando com cerca de 52% da geração de resíduos do país com cerca de 24,5 milhões de toneladas no ano, porém, região centro-oeste chamou atenção devido a sua coleta per capita de 319kg/hab/ano ultrapassando o Sudeste com cerca de 275kg/hab/ano (ABRELPE, 2021).

Com o intuito de minimizar cada vez mais os resíduos produzidos pela construção civil, foi-se elaborado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS e nele constam diretrizes e estratégias para os RCCs. A diretriz número 1 tem como objetivo eliminar todas as áreas de disposição final que possuam irregularidades no território nacional. Como segunda diretriz há a implantação de áreas de reciclagem, áreas onde possa acontecer uma reserva adequada de RCC e, também, áreas de transbordo e triagem para os materiais. Na terceira e na quarta diretrizes são citadas a realização de inventários dos resíduos gerados e a reciclagem e reutilização dos mesmos nos empreendimentos tanto públicos quanto privados (PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS, 2012).

Além disso, o PNRS estipula metas para essas diretrizes como apresentado nas tabelas a seguir:

Tabela 2 – Meta 1 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta1: Eliminação de 100% de áreas de disposição irregular até 2014 (Bota Foras)						
META	REGIÃO	PLANO DE METAS				
Eliminação de 100% de áreas de disposição irregular até 2014 (Bota foras)	Brasil	2015	2019	2023	2027	2031
		100				
	Região Norte	100				
	Região Nordeste	100				
	Região Sul	100				
	Região Sudeste	100				
	Região Centro-Oeste	100				

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Tabela 3 – Meta 2 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta 2: Destinação de RCC para aterros classe A licenciados em 100% dos municípios							
META	REGIÃO	SITUAÇÃO ATUAL	PLANO DE METAS				
Destinação de RCC para aterros classe A licenciados em 100% dos municípios	Brasil	1948	2015	2019	2023	2027	2031
			100				
	Região Norte	180	100				
	Região Nordeste	857	100				
	Região Sul	184	100				
	Região Sudeste	514	100				
	Região Centro-Oeste	213	100				

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Tabela 4 – Meta 3 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta 3: Implementação de PEV's Áreas de Triagem e Transbordo em 100% dos municípios						
META	REGIÃO	PLANO DE METAS				
Implementação de PEV's Áreas de Triagem e Transbordo em 100% dos municípios	Brasil	2015	2019	2023	2027	2031
		100				
	Região Norte	100				
	Região Nordeste	100				
	Região Sul	100				
	Região Sudeste	100				
	Região Centro-Oeste	100				

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Tabela 5 – Meta 4 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta 4: Reutilização e Reciclagem de RCC em 100% dos municípios, encaminhando os RCC para instalação de recuperações						
META	REGIÃO	PLANO DE METAS				
Reutilização e Reciclagem de RCC em 100% dos municípios, encaminhando os RCC para instalação de recuperações	Brasil	2015	2019	2023	2027	2031
	Região Norte	75	100			
	Região Nordeste	60	80	100		
	Região Sul	60	80	100		
	Região Sudeste	50	70	85	100	
Região Centro-Oeste	75	100				

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Tabela 6 – Meta 5 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta 5: Elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção, pelos grandes gerados, e implantação de sistema declaratório dos gerados, transportadores e áreas de destinação						
META	REGIÃO	PLANO DE METAS				
Elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção, pelos grandes gerados, e implantação de sistema declaratório dos gerados, transportadores e áreas de destinação	Brasil	2015	2019	2023	2027	2031
		100				
	Região Norte					
	Região Nordeste					
	Região Sul					
	Região Sudeste					
Região Centro-Oeste						

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Tabela 7 – Meta 6 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta 5: Elaboração de diagnóstico quantitativo e qualitativo da geração, coleta e destinação dos resíduos						
META	REGIÃO	PLANO DE METAS				
Elaboração de diagnóstico quantitativo e qualitativo da geração, coleta e destinação dos resíduos	Brasil	2015	2019	2023	2027	2031
		100				
	Região Norte					
	Região Nordeste					
	Região Sul					
	Região Sudeste					
	Região Centro-Oeste					

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012

Sendo assim, é possível viabilizar a redução na geração dos quase 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (ABRELPE, 2021), a partir da utilização das diretrizes e metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos que contribuem não só para os RCCs mas como também para todos os resíduos sólidos urbanos gerados – cerca de 82,5 milhões de toneladas segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil de 2021.

Segundo as normas regidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) existe uma classificação quanto aos resíduos gerados pela construção civil tendo como objeto através dessa classificação minimizar os impactos ambientais gerados. A Resolução 307, de 5 de julho de 2002 é a norma que define e classifica os RCC's.

Segundo a Resolução 307 (2002, fl.1), os resíduos da Construção Civil,

São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Tendo em vista essa definição, a classificação dos resíduos é feita conforme a tabela abaixo:

Tabela 8 – Classificação dos resíduos segundo o CONAMA

CLASSE	CARACTERÍSTICAS
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado
B	Resíduos recicláveis como plásticos, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, embalagens de tintas
C	Resíduos os quais não foram criadas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação
D	Resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde

Fonte: CONAMA – Resolução 307 – Artigo 3º (página 3)

Sendo assim, o resíduo em estudo, o de beneficiamento de rochas, é classificado como CLASSE A tendo em vista sua inserção em matrizes cimentícias.

2.3 PRODUÇÃO DE CONCRETOS

2.3.1 Cimento Portland

Em meados de 1830 que o inglês Joseph Aspdin iniciou o processo de fabricação de um ligante que resultava na mistura entre calcário e argila em suas determinadas proporções formando um pó fino. Após a sua secagem, a mistura encontrava-se tão dura a ponto de existir uma comparação com as pedras utilizadas para as construções na época (SNIC, 2006).

O nome cimento Portland deu-se através das características que a mistura obtinha. Transformado em pó, sua cor e características remetiam a um tipo de pedra existente na ilha de Portland e, por isso, após passar por vários nomes como “cimento romano” e “cimento britânico”, definiu-se o nome que, é conhecido mundialmente: “cimento Portland” (CONSULTEC, 1967).

Hoje, sua denominação é dada por um ligante hidráulico obtido através da moagem de clínquer Portland ao qual são adicionados uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos por norma (NBR 16697, 2018).

2.3.2 Tipos de Cimento Portland

Os cimentos Portland podem ser classificados em nove tipos normatizados no Brasil, diferenciando-se pelas quantidades e composições existentes em cada um. A norma utilizada para a classificação é a NBR 16697, 2018. A Tabela 9 caracteriza os tipos de cimento.

Tabela 9 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagens de massa)

Designação Normalizada		Sigla	Classe de Resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	EGAF	MP	MC
Cimento Portland Comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95-100	0-5		
		CP I-S			90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno		CP III			25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI	90-100	0	0
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25,32 ou 40	75-100	-	-	0-25	
	Não Estrutural		-	50-74	-	-	26-30	

Legenda: MP: material pozolânico; MC: material carbonático; EGAF: escória granulada de alto forno.

Fonte: ABNT NBR 16697: 2018 (página 5)

As definições de cada um dos tipos de cimento são transcritas na NBR 16697, (ABNT, 2018), onde o cimento Portland comum é denominado um ligante hidráulico estabelecido pela moagem no clínquer ao qual são adicionados sulfatos de cálcio e adições minerais em teores exigidos por norma. O cimento Portland de alto-forno é obtido através da mistura homogênea de clínquer e escória granulada de alto-forno,

podendo adicionar sulfatos de cálcio e materiais carbonáticos estabelecidos por norma. Já o cimento Portland pozolânico é atingido quando há uma mistura homogênea entre clínquer e materiais pozolânicos, ou seja, materiais silicosos ou silicoaluminosos podendo, ainda, serem acrescentados sulfatos de cálcio e materiais carbonáticos. O cimento de alta resistência inicial é aquele que atende os requisitos para atingir a alta resistência e o cimento branco é aquele que possui adições que não alteram sua cor – sulfatos de cálcio e outros.

A diferença existente entre os tipos de cimento diz respeito as porcentagens das composições de clínquer, adições minerais e sulfato de cálcio adicionados nos processos finais de fabricação, na moagem final, no acréscimo de pozolanas, escórias e filer calcário (BATTAGIN, 2011).

2.3.3 Consumo de Cimento Portland

2.3.3.1 Cimento Portland no mundo

No ano de 2019, as empresas e fabricantes de cimento foram responsáveis por cerca de 7,0% da emissão de CO₂ no mundo (Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2019). Os assuntos relacionados aos impactos ambientais têm gerado grandes discussões que possuem como intuito minimizar a geração de resíduos. Na construção civil, um dos materiais que mais ocasionam danos ao meio ambiente durante sua fabricação é o cimento, devido ao alto volume de dióxido de carbono - gás do efeito estufa - que é emitido, juntamente, com excessivo consumo energético (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017 E CLIMATE CHANGE 2007).

Tendo em vista a geração de poluentes no meio ambiente, a indústria de cimento como um todo vem executando e intensificando melhorias nos seus processos de fabricação a fim de minimizar seus impactos ambientais. Desde os anos 2000 existe a *Cement Sustainability Initiative* (CSI), iniciativa criada mundialmente para ser um dos maiores programas de sustentabilidade do setor, juntando cerca de 23 das maiores empresas cimenteiras do mundo e mais de 100 países. Há dados disponíveis atualmente até o ano de 2014 (SNIC, S/D).

2.3.3.2 Consumo de Cimento Portland no Brasil

No Brasil, o consumo de cimento vem apresentando um grande crescimento ao decorrer dos anos. Em uma comparação feita entre os anos de 2020 e 2021 no período de janeiro a junho obtiveram-se os dados de 27.180.919 toneladas e 31.503.773 toneladas, respectivamente, de cimento consumidas no mesmo período do ano (SNIC, 2020 e 2021). Segundo a Figura 8, a região que mais consumiu cimento até junho de 2021 foi a região Sudeste, destacando-se o estado de São Paulo com cerca de 5.942.666 toneladas.

Figura 8 - Quadro de Consumo de Cimento nas Regiões do Brasil

REGIÕES E ESTADOS	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
REGIÃO NORTE	277.048	261.489	293.674	297.119	334.490	359.142	-	-	-	-	-	-	1.803.952
Rondônia	35.615	32.034	36.930	38.240	44.660	43.439	-	-	-	-	-	-	230.918
Acre	13.523	9.636	11.165	13.435	19.408	16.602	-	-	-	-	-	-	83.769
Amazonas	40.011	42.063	49.387	51.654	52.700	56.166	-	-	-	-	-	-	291.981
Roraima	14.119	12.288	11.384	11.683	10.268	12.188	-	-	-	-	-	-	71.910
Pará	102.070	100.248	104.554	112.921	130.300	142.425	-	-	-	-	-	-	692.518
Amapá	11.136	9.216	12.152	12.958	12.879	13.924	-	-	-	-	-	-	72.265
Tocantins	41.574	37.004	38.102	41.248	47.265	49.398	-	-	-	-	-	-	254.591
Ajustes	19.000	19.000	20.000	15.000	17.000	16.000	-	-	-	-	-	-	106.000
REGIÃO NORDESTE	1.220.778	1.087.104	1.225.963	1.096.230	1.113.993	1.146.288	-	-	-	-	-	-	6.860.353
Maranhão	82.674	69.076	72.303	75.399	89.958	87.816	-	-	-	-	-	-	477.226
Piauí	67.343	53.335	62.799	61.534	68.772	71.164	-	-	-	-	-	-	384.947
Ceará	170.356	145.649	156.169	151.904	153.668	174.530	-	-	-	-	-	-	952.276
Rio Grande do Norte	73.317	59.813	77.672	62.575	59.378	65.578	-	-	-	-	-	-	398.333
Paraíba	96.375	84.138	94.985	88.837	84.853	90.095	-	-	-	-	-	-	539.283
Pernambuco	175.331	163.195	185.966	159.587	152.682	161.977	-	-	-	-	-	-	998.738
Alagoas	50.213	44.866	53.960	46.658	44.643	44.571	-	-	-	-	-	-	284.911
Sergipe	42.517	44.162	53.871	44.494	37.865	37.706	-	-	-	-	-	-	260.615
Bahia	340.652	287.870	354.238	306.242	323.174	313.848	-	-	-	-	-	-	1.926.024
Ajustes	122.000	105.000	114.000	99.000	99.000	99.000	-	-	-	-	-	-	638.000
REGIÃO CENTRO-OESTE	453.794	444.762	495.835	532.445	591.434	558.459	-	-	-	-	-	-	3.076.749
Mato Grosso do Sul	74.556	77.176	96.162	96.070	96.714	87.716	-	-	-	-	-	-	530.394
Mato Grosso	113.413	118.308	134.888	140.980	161.690	159.157	-	-	-	-	-	-	828.436
Goiás	206.900	197.352	203.171	226.450	280.121	242.536	-	-	-	-	-	-	1.336.570
Distrito Federal	58.925	51.906	61.614	66.945	72.909	89.050	-	-	-	-	-	-	381.349
REGIÃO SUDESTE	2.214.487	2.006.956	2.434.941	2.337.559	2.443.229	2.420.616	-	-	-	-	-	-	13.857.768
Minas Gerais	581.608	480.081	639.374	590.176	646.059	604.998	-	-	-	-	-	-	3.544.278
Espírito Santo	107.050	87.266	110.781	90.704	89.617	88.470	-	-	-	-	-	-	573.888
Rio de Janeiro	228.070	212.958	252.909	237.480	235.758	251.783	-	-	-	-	-	-	1.418.938
São Paulo	923.739	861.651	1.041.877	1.006.219	1.046.785	1.062.395	-	-	-	-	-	-	5.942.666
Ajustes	374.000	365.000	390.000	413.000	423.000	413.000	-	-	-	-	-	-	2.378.000
REGIÃO SUL	830.790	913.402	1.085.002	1.034.284	1.053.623	987.890	-	-	-	-	-	-	5.904.951
Paraná	318.454	369.143	429.394	417.032	427.578	368.003	-	-	-	-	-	-	2.349.604
Santa Catarina	270.432	303.917	357.965	341.342	349.420	335.265	-	-	-	-	-	-	1.958.341
Rio Grande do Sul	235.904	235.342	292.643	270.910	271.625	259.582	-	-	-	-	-	-	1.566.006
Ajustes	6.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	-	-	-	-	-	-	31.000
BRASIL	4.996.877	4.683.733	5.525.415	5.297.637	5.536.759	5.463.352	-	-	-	-	-	-	31.803.773

Fonte: Consumo Aparente de Cimento por Regiões e Estados (t) 2021 – SNIC 2021.

Em contrapartida, o consumo de cimento demasiado em grandes quantidades acaba, por sua vez, agredindo o meio ambiente em forma de gases de efeito estufa. Entretanto, ainda assim, a indústria brasileira de cimento é reconhecida com um dos menores índices de emissão específica de CO₂ no mundo. Entre os anos de 1990 e 2014, a produção de cimento teve um aumento de 273%, passando de 26 toneladas para 71 toneladas produzidas. Já a emissão de gases aumentou cerca de 233% nesse período por conta da redução de 18% das emissões específicas, ou seja, passou-se de 700kg CO₂/t cimento para 564kg CO₂/t cimento (DE OLIVEIRA, M.G.F., 2019)

2.4 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O processo produtivo do cimento Portland ocorre através das reações entre os minerais do cimento e água que originam uma pasta que, ao decorrer do tempo, endurece e é classificada como um aglomerante (PEDROSO, 2009).

O processo de fabricação do cimento Portland consiste, basicamente, em três grandes etapas, sendo elas a moagem da matéria-prima, na queima para formação de clínquer e, a terceira etapa, consiste na adição de minerais e uma moagem final para a formação do pó fino (NEVILLE, A.M, 2016).

As etapas da produção de cimento, consistem, basicamente, em dez estágios descritos abaixo (DE OLIVEIRA, M.G.F.,2019):

- 1) Extração da matéria-prima;
- 2) Britagem;
- 3) Preparação de farinha crua;
- 4) Tratamento de matérias-primas e combustíveis alternativos;
- 5) Pré-aquecimento;
- 6) Pré calcinação;
- 7) Produção de clínquer no forno rotativo;
- 8) Resfriamento e armazenamento;
- 9) Moagem do cimento;
- 10) Armazenamento e despacho.

Figura 9 – Processo de produção do Cimento



Fonte: Roadmap Tecnológico de Cimento, 2019 apud IEA/WBCSD (página 15)

A Figura 9 ilustra os processos de fabricação do cimento, dentre as dez etapas descritas, pode-se, ainda, subdividi-las em dois grupos, um formado pelas etapas de 1 a 7 que representam o processo de produção do clínquer. O outro grupo é caracterizado pela moagem final do clínquer para a produção e estocagem do cimento, composto pelas etapas de 8 a 10. O processo pode ser executado de forma úmida ou seca – no Brasil a forma mais utilizada é a seca – apresentando como principal diferença a existência de água no processo, tornando-o energeticamente menos eficiente (MEHTA e MONTEIRO, 2008; SHEN et al., 2015).

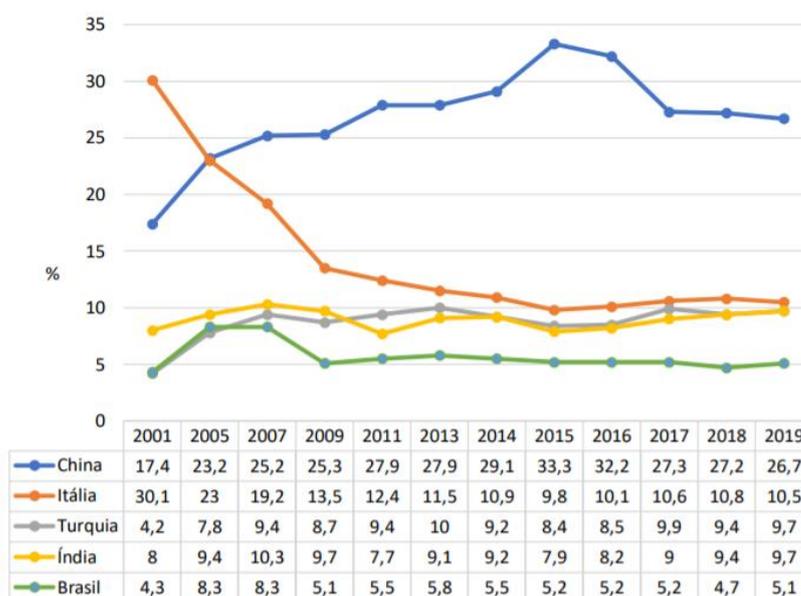
2.5 PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Durante as últimas duas décadas, o Brasil vem se destacando mundialmente na produção e exportação de rochas ornamentais. O país está sendo notado pela sua ampla variedade de matérias-primas, sendo considerado a região com maior geodiversidade (ABIROCHAS, 2017). Destaca-se, também, o estado do Espírito Santo, nele há uma nucleação de um importante arranjo produtivo e lavra de beneficiamento, além de possuir áreas em seus extremos norte e sul com grandes jazimentos de mármore e granito. Sendo, ainda, importante salientar que no território brasileiro, encontra-se o maior parque mundial de serragem de chapas, onde são

operadas mais de 360 unidades dos modernos teares multifio diamantados utilizados para desdobrar blocos e fazer cortes nas rochas (CHIODI FILHO, 2021).

Considerando seu importante papel no meio das indústrias de rochas ornamentais, o Brasil encontra-se em quinto lugar no ranking mundial de exportação da matéria prima. Tendo seu faturamento notado nos últimos 20 anos e estando atrás apenas de países como a China, em primeiro lugar, em segundo Itália, em terceiro e quarto estão Turquia e Índia. No ano de 2021, foram produzidas cerca de 1,99 milhões de toneladas de rochas ornamentais para exportação, 10,3% a frente de dados obtidos em 2020. Já a importação cresceu cerca de 47% se comparado ao ano de 2020 (CHIODI FILHO, ABIROCHAS, 2021).

Figura 10 – Exportações Mundiais em faturamento

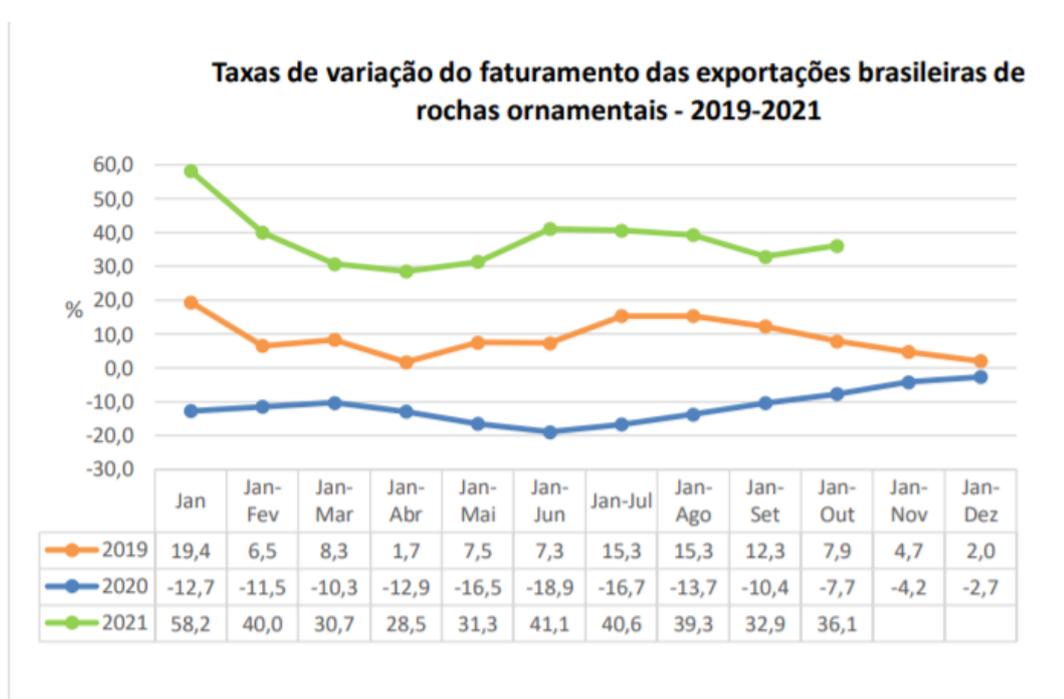


Fonte: O Desempenho Brasileiro no Setor de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS 2021 -
página 2

Ainda importante citar que, além do posicionamento brasileiro no ranking mundial de exportação de rochas ornamentais, o crescimento do faturamento da exportação no Brasil mostrou um grande destaque no ano de 2021. Fazendo uma comparação com anos anteriores, 2019, por exemplo, no mês de janeiro o faturamento encontrava-se em 19,4%, já em 2021, no mesmo mês, tem-se os dados

de que o faturamento estava em 58,2% (ABIROCHAS, 2021). O gráfico a seguir ilustra os dados obtidos.

Figura 11 - Taxas de variação do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais



Fonte: Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período de Janeiro-Outubro de 2021 – Abirochas (p.5)

É possível perceber o crescimento da indústria das rochas ornamentais a medida que a produção de rochas nacionais se concentra, em sua maior, parte na região sudeste, sendo o estado do Espírito Santo o maior produtor de rochas ornamentais, cerca de 3.600.000 toneladas de, basicamente, granitos e mármores.

Tabela 10 - Produção de rochas ornamentais por regiões no Brasil em 2015

REGIÃO	UF	PRODUÇÃO (t)	TIPO DE ROCHA
Sudeste	Espírito Santo	3.600.000	Granito e mármore
	Minas Gerais	2.000.000	Granito, ardósia, quartzito foliado, pedra-sabão, pedra-talco, serpentinito, mármore e basalto
	Rio de Janeiro	200.000	Granito, mármore e pedra paduana (gnaisse)
	São Paulo	100.000	Granito, quartzito foliado

Sul	Paraná	200.000	Granito e mármore
	Rio Grande do Sul	150.000	Granito, basalto e quartzito
	Santa Catarina	150.000	Granito, ardósia e mármore
Centro-Oeste	Goiás	290.000	Granito, quartzito foliado, serpentinito
	Mato Grosso	50.000	Granito
	Mato Grosso do Sul	40.000	Granito e mármore
Nordeste	Bahia	900.000	Granito, mármore, travertino, arenito e quartzito
	Ceará	700.000	Granito e pedra cariri (calcário piaqueado)
	Paraíba	430.000	Granito e conglomerado
	Pernambuco	140.000	Granito e quartzito
	Alagoas	160.000	Granito
	Rio Grande do Norte	170.000	Mármore e granito
	Piauí	100.000	Pedra Morisca (arenito acosiano) e ardósia
Norte	Rondônia	50.000	Granito
	Roraima	10.000	Granito
	Pará	30.000	Granito
	Tocantins	10.000	Granito, chert (quartzito), serpentinito
Total		9.500.000	

Fonte: Estudo da Competitividade Brasileira no Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento, Abirochas 2018 (página 45).

Pode-se observar que o Brasil é um grande produtor de rochas ornamentais possuindo uma extensa variedade e tipos de rochas, a região Sudeste caracterizada com a maior produtora do país.

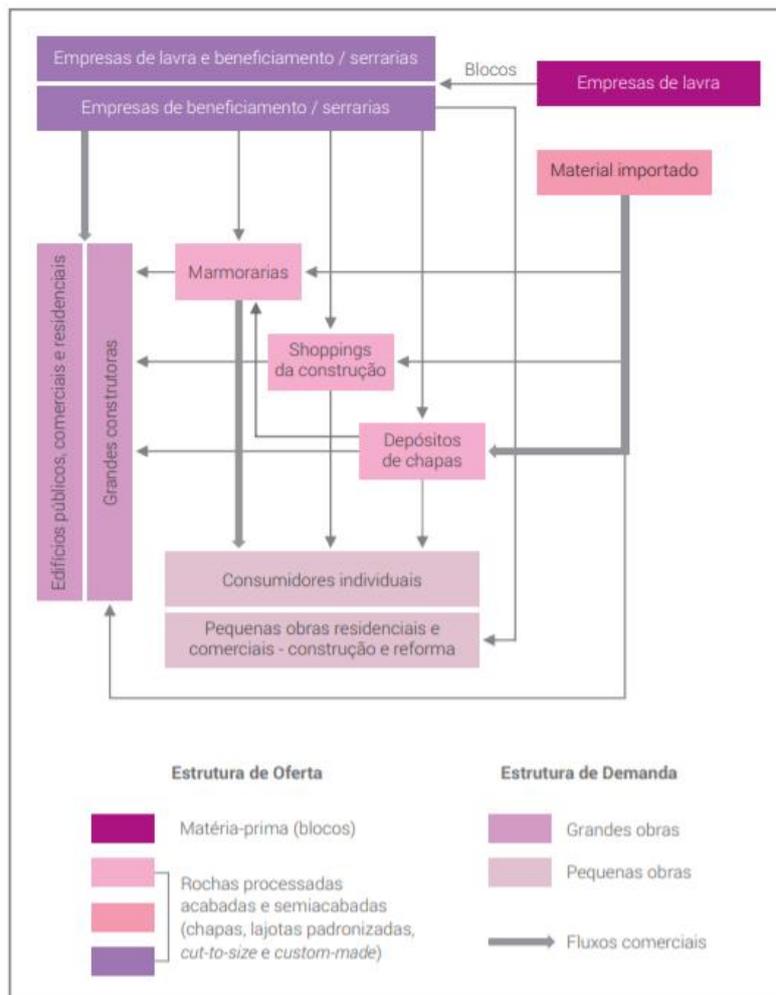
Além disso, ressalta-se a produção de granito no país, pois, dos vinte e dois estados mencionados na Tabela 10, apenas o Piauí não é um produtor de granito. E, em segundo lugar, encontra-se o mármore produzido em cerca de oito estados. A formação, tanto de granitos, quanto de mármore brasileiros existe a mais de 500 milhões de anos, alguns alcançando a idade de 2 bilhões de anos o que reflete na durabilidade esperada para as rochas para seus meios de destinação como revestimentos (ABIROCHAS, 2020).

2.5.1 Cadeia produtiva do setor das rochas ornamentais

A cadeia produtiva do setor das rochas ornamentais é muito simples se comparada a outros processos. Consiste em três etapas principais, sendo elas a extração dos blocos, denominado lavra, a serragem e polimento das chapas – beneficiamento primário – e, por fim, marmoraria onde são feitos os acabamentos finais das rochas (RODRIGUES; CHOIDI FILHO, 2020).

O esquema a seguir, ilustra a estrutura de comercialização e produção das rochas ornamentais, desde as empresas iniciais de lavra, até o seu destino final como os consumidores, empresas terceirizadas etc (RODRIGUES; CHOIDI FILHO, 2020).

Figura 12 - Estrutura produtiva e de comercialização das rochas ornamentais



É possível perceber que a comercialização de rochas ornamentais exerce diversas funções em diversos setores da construção civil, seja para pequenas como grandes obras para questões estéticas como também, da sua sobra, atua como resíduo podendo ser utilizado em concretos. Sem contar a atuação que elas possuem no mercado de importação e exportação brasileiro.

2.5.1.1 Etapa de Lavra

As etapas para a execução da lavra são de suma importância. Inicialmente são realizados ensaios de caracterização, para isso, são efetuados levantamentos geológicos de superfície, com a finalidade de qualificar e identificar os tipos de rochas. Em seguida, são realizadas as coletas de amostras para serem feitos testes expedidos do polímero. Podem, ainda, serem realizadas sondagens rasas para obter-se a espessura de capeamento de solo e rochas alteradas (RODRIGUES; CHOIDI FILHO, 2020).

A etapa da lavra é realizada a partir de métodos de extração, sendo eles subdivididos em cinco grupos descritos abaixo:

- a) Lavra por Desmoronamento ou desabamento: aplicada em casos em que a rocha possui formato prismático contendo falhas ou planos de esfoliação aparentes em afloramentos encontrados em grandes gradientes topográficos (VIDAL et. al, 2014);
- b) Lavra Seletiva: ocorre em casos em que o maciço é caracterizado por fraturas com orientações ortogonais, aproveitadas como planos naturais de separações rochosas, obtendo-se, assim, volumes liberados para realizar recortes e esquadrajamentos (ALENCAR et. al, 1996);
- c) Lavra de Matacões: é utilizada para o tombamento dos matacões. São divididos em duas ou mais partes para esquadrejamento em blocos. Uma das técnicas mais utilizadas é a da pólvora negra (VIDAL et. al, 2014);
- d) Lavra por Bancadas: inicialmente é feita uma subdivisão de níveis que seguem uma sequência, as alturas são definidas conforme a geomorfologia da jazida e das características das rochas. São divididas em bancadas altas onde obedecem uma geometria em formato “L” formando corredores e bancadas baixas cujas alturas correspondem a uma das dimensões do bloco comerciável (VIDAL et. al, 2014);

- e) Lavra Subterrânea: consiste na abertura de espaços subterrâneos, denominados salões, sustentados por pilares de onde são extraídos os materiais (CARANASSOIS, 1993).

2.5.1.2 Etapa de Beneficiamento Primário

O beneficiamento primário é também chamado de serragem ou desdobramento, onde são feitos os cortes das peças já nas dimensões e medidas aproximadas do produto acabado. As placas possuem, usualmente, cerca de dois a três centímetros de espessura (SILVEIRA et. al. 2014). No Brasil, os equipamentos mais utilizados para essa finalidade são os teares multifios diamantados, os teares convencionais e os talha-blocos (MARQUES et al., 2006). Os processos utilizados para o acabamento de face variam em apicoamento, flameamento, jateamento etc, para serem feitas a resinagem e polimentos das chapas (RODRIGUES; CHOIDI FILHO, 2020).

2.5.1.3 Etapa de Marmoraria

Chamada também de beneficiamento secundário, essa etapa consiste em serem executados os acabamentos finais para as peças como cortes e dimensões específicas (PARAGUASSÚ et al., 2005).

Está ligada diretamente com o consumidor, pois é através da marmoraria que são feitas as destinações finais das rochas. O processo é simples, são feitos recortes, colagens e acabamentos nas superficiais e bordas das peças (RODRIGUES; CHOIDI FILHO, 2020).

2.6 TIPO E VOLUME DE RESÍDUO GERADO PELAS ROCHAS ORNAMENTAIS

Através da produção e dos processos de beneficiamento primário em que as rochas ornamentais são submetidas, acabam sendo produzidos resíduos sólidos que, geralmente, são descartados em lagoas de decantação ou aterros, muitas vezes, sem um processo de tratamento adequado para reduzir os constituintes (NUNES et al, 2002).

A partir do processo de recorte, polimento e lustro das peças, os rejeitos formados são materiais de elevada finura. Essa lama residual tornou-se um grande problema ambiental pois gera uma grande quantidade de efluentes (DEGEN et al, 2013). Além disso, os rejeitos formados pela etapa de serragem nos atearos gera cerca de 25% a 30% de pó vindo dos blocos. Em seguida, esses pós são descartados em depósitos nos pátios das empresas gerando mais resíduos e acarretando problemas ao meio ambiente (GONÇALVES; MOURA, 2002; MOTHÉ FILHO, et al., 2005). Com isso, o setor das rochas ornamentais no Brasil produz cerca de 9.500.000 toneladas de resíduos por ano (CHIODI FILHO, 2015).

2.7 USO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM CONCRETOS

Dentre os materiais utilizados pela construção civil, o concreto é o mais utilizado mesmo que não apresente tanto resistência e tenacidade como o aço, por exemplo. Além disso, é possível destacar sua excelência a resistência à água, sua facilidade de execução de seus elementos que possuem diversas dimensões e formas e, ainda, por ser considerado um material de fácil acesso e de baixo custo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A produção de concreto vem apresentando um constante crescimento se comparado a anos anteriores. Em análises feitas mundialmente, são produzidos cerca de 10 bilhões de metros cúbicos e, com isso, surgem os estudos para diminuir o consumo de concreto em obras. Para isso, estão sendo feitas inovações no que diz respeito aos constituintes do concreto, dando chances de serem inseridos resíduos sólidos de reutilização ou reciclagem (GOU, ZHON E THEN, 2019) a fim de viabilizar e reciclar resíduos que, muitas vezes, são descartados incorretamente e acabam impactando o meio ambiente. Além disso, é uma maneira de aprimorar as técnicas de execução das matrizes cimentícias.

A Tabela 11 relata alguns estudos já realizados sobre a adição de resíduos de beneficiamento de rochas em concretos.

Tabela 11 – Estudos com a utilização de Resíduos de Beneficiamento de Rochas

Nome do Estudo	Autores do Estudo	Variáveis	Resultados
Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais	V.Y.SATO, A.P.L.GALINA, J.E.L.S.TEIXEIRA, A, 2018	* % de substituição: 5,10 e 15; * proveniente do desdobramento dos blocos nos teares de fios diamantados e do polimento das chapas das rochas	É possível observar em todos os gráficos que o resíduo C R15 (15% de resíduo) apresenta os maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade; - Espera-se que mesmo após a adição de resíduo em teores elevados (15%), a trabalhabilidade da mistura não é afetada caso seja utilizada uma relação a/c de 0,65. Já para relações a/c menores, espera-se uma redução da trabalhabilidade por causa de uma maior aglomeração das partículas; - Com o aumento do teor de RBRO, diminui o abatimento e aumenta a tensão de escoamento. Isso confirma que o resíduo se comportou como filler, tornando a amostra mais viscosa e com menor trabalhabilidade, pois preenche os vazios intergranulares na matriz.
Uso de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial ao aglomerante na produção de concretos estruturais	F.R.TEIXEIRA, F.C.MAGALHÃES, G.B.WALLY, F.K.SELL JUNIOR, C.M.PALIGA, A.S.TORRES,20 20	* % de substituição: 5, 7,5, 10 e 12; * a/c: 0,60 * coletado na forma de lama, foi gerado por uma empresa local de beneficiamento de rochas ornamentais	- Nas primeiras idades, com exceção do teor de 12,5% os traços com substituição de cimento pelo RBRO proporcionaram maior resistência que o traço de referência; - Ao serem analisados os resultados obtidos pelo teste de Tukey, é possível observar que aos 28 dias, somente o concreto com 12,5% de substituição do cimento pelo RBRO pode ser considerado estatisticamente diferente do concreto de referência, com significância superior a 95%; - Os concretos com 5% e 7,5% de substituição não apresentaram diferença estatística significativa nos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão, em relação ao traço de referência.
Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais	Maxwell Klein Degen, Geilma Lima Vieira, João Luiz Calmon, Juliana Gavinil Uliana,	-% de substituição de: 0, 5, 10 e 15; -a/c: 0,45; 0,55; 0,65	- Quanto à resistência a compressão o teor de 5% de substituição foi o que melhor se destacou para a relação água/cimento de 0,45, onde houve um incremento na resistência e para a resistência a tração por compressão diametral os teores de 5% e 10% com relação a/c de 0,45 se mostraram com a mesma resistência do concreto referência;

como substituto parcial de cimento	Rubielly Santos Bastos, 2013		- Quanto a sua trabalhabilidade analisada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone o concreto perde trabalhabilidade à medida que se aumenta o percentual de substituição do cimento pelo RBRO.
Relevance of Ornamental Stone Residues in the Manufacture of Concrete Blocks for Structural Masonry	Afonso Rangel Garcez Azevedo, Jonas Alexandre, Gustavo de Castro Xavier, Verônica Scarpini Candido, Sergio Neves Monteiro, Carlos Maurício Fontes Vieira, 2014	% de substituição: 20 - Adicionado resíduo de mármore/granito no concreto	O valor da resistência a compressão de $4,01 \pm 0,38$ MPa está dentro do desvio padrão semelhante à resistência dos blocos livres de resíduos tradicionais.
Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete	Ali A. Aliabdo, Abd Elmoaty M., Esraa M. Auda	% de substituição: 5;7,5;10;15 - Adicionado resíduo de mármore no concreto	- Uma redução na resistência a compressão da argamassa com a substituição de cimento por resíduo apresenta redução de 5% menor do que a amostra referencial no traço com 15% de substituição; - O resultado obtido para 15% de substituição mostrou-se comparável ou inferior ao traço referencial; - A resistência do concreto aumenta consideravelmente com a substituição da areia pelo resíduo e não pelo cimento.
Strength and microstructure correlation of binary cement blends in presence of waste marble powder	Vijav Kumar, Sandeep Singla, Rishav Garg	% de substituição: 5;10;15;20 - Adicionado resíduo de mármore no concreto	- A resistência à compressão do concreto aumentou até 10,0% de substituição seguido por uma diminuição gradual nas idades estudadas; - Para os exemplares com 15,0% e 20,0% de resíduo como substituto do cimento, comparando com a mistura de controle, uma diminuição na força de 11% e 22% após 7 dias e 12% aos 28 dias
Behavior of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement	M.A. Rashwan, T.M.Al – Basiony, A.O. Mashaly, M.M. Khalil	% de substituição: 10,20,30 - Adicionado resíduo de mármore e granito no concreto	- A resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de resíduo, com declínio insignificante em 10 substituições de resíduo de 5,14–4,6%, respectivamente, em comparação com a mistura de controle; - Observa-se a partir destes resultados, que as propriedades mecânicas aumentam com o procedimento em tempos de cura de 7 a 28 dias, enquanto diminuem com o aumento dos níveis de substituição tanto do resíduo de mármore quanto de granito;

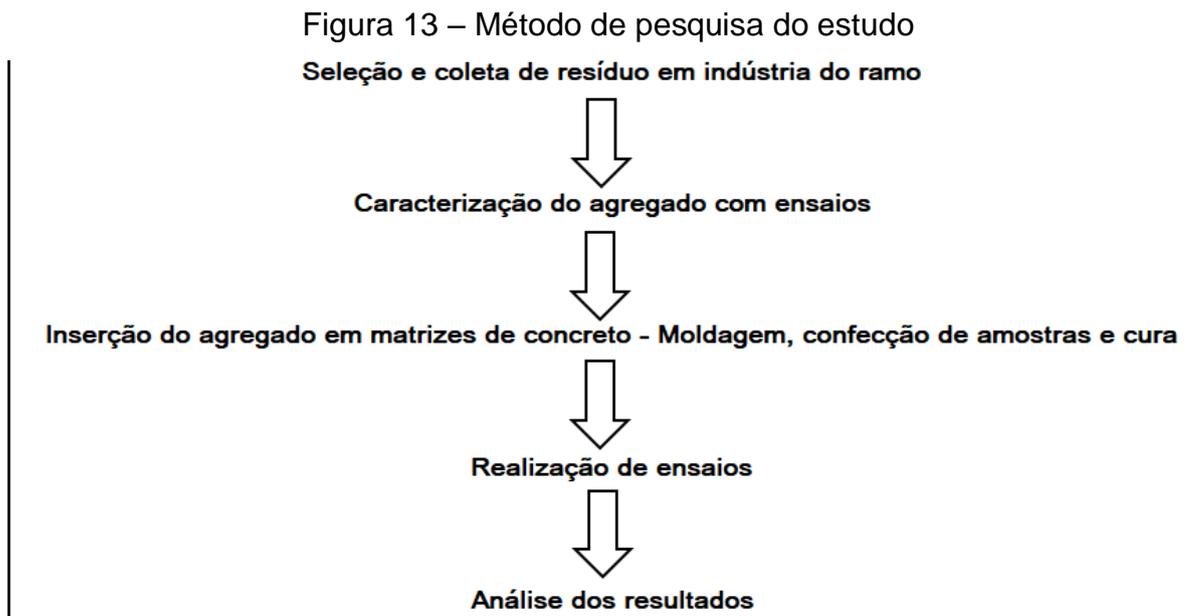
			- Em relação aos resultados de resistência à compressão, a redução nos valores de resistência em relação à mistura controle é desprezível até a substituição de 10%, aos 28 dias por (5,14%) e (4,60%) para mármore e granito;
--	--	--	--

Fonte: Elaborado pela autora, com base nos autores citados

Pode-se perceber que a porcentagem de resíduo inserido no concreto não ultrapassa os 20% e se mantém em 75% dos casos entre 5 e 15% de substituição de cimento Portland pelo resíduo. Destaca-se, ainda, que a trabalhabilidade do concreto perdeu eficiência à medida que se foi acrescentado mais resíduo. Já para o ensaio resistência a compressão, os resultados se mantiveram padrões entre os estudos. Tendo em vista esses quatro estudos, foram-se executados os ensaios descritos no item 3.0 a fim de obter-se mais informações e resultados da substituição do cimento pelo resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais.

3 METODOLOGIA

A pesquisa do presente trabalho é do tipo experimental e envolveu a caracterização de um resíduo e a análise da sua inserção em matrizes de concreto. O método de pesquisa desse estudo é sintetizado na Figura 13.



Fonte: Elaborado pela autora

As etapas são descritas no item 4.2, enquanto os materiais empregados constam no item 4.1

3.1 MATERIAIS

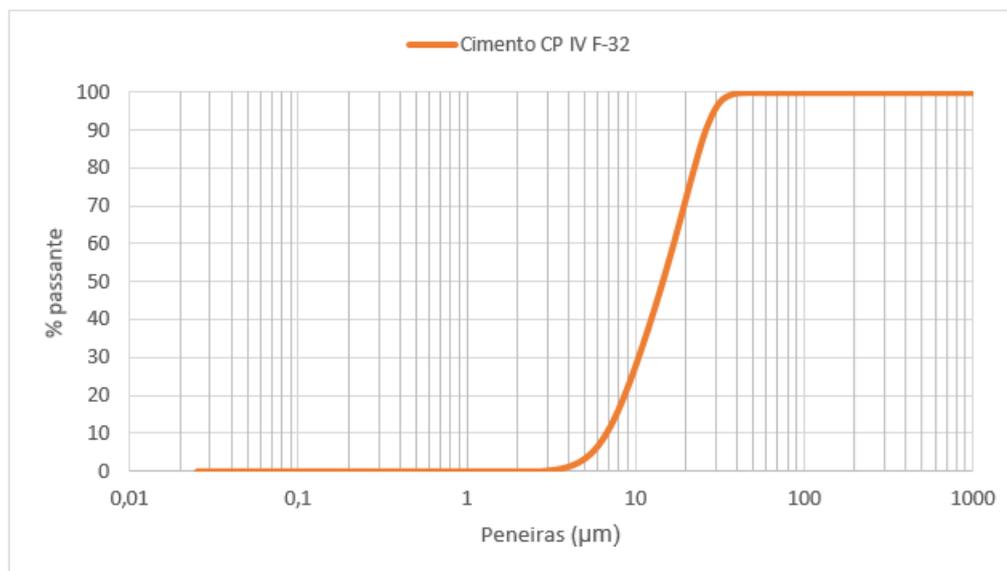
Nos itens a seguir, foram identificados e descritos os materiais utilizados para o estudo.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi do tipo Portland, CP IV- 32-F da marca Votorantim. A caracterização do cimento foi feita de acordo com a sua granulometria e pelo ensaio de área superficial. Para obter-se tais dados, foram executados ensaios de massa específica, área superficial (BET), granulometria a laser e fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório LCVMat da Unisinos.

A partir do Gráfico 1 foi-se representada a granulometria do aglomerante. A Tabela 12 apresenta a composição química do cimento, juntamente com o quantitativo de materiais que compõe o cimento.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Cimento



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12 – Resultados obtidos do ensaio de raio – X (FRX)

Composição Química	Quantidade de material (%)
<i>Na₂O</i>	0,161
<i>MgO</i>	3,198
<i>Al₂O₃</i>	10,901
<i>SiO₂</i>	26,160
<i>P₂O₅</i>	0,005
<i>K₂O</i>	1,1841
<i>SO₃</i>	0,916
<i>CaO</i>	23,858
<i>TiO₂</i>	0,657
<i>Cr₂O₃</i>	0,020
<i>MnO</i>	0,074
<i>Fe₂O₃</i>	4,001
<i>ZnO</i>	0,034
<i>SrO</i>	0,070
<i>L. O. I</i>	7,034

Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, a massa específica foi obtida no valor de 2,63 g/cm² e, o ensaio de área superficial, o resultado foi de 2,09 m²/g.

3.1.2 Agregados graúdo e miúdo

O agregado miúdo foi retirado do rio Jacuí, na região de Porto Alegre, a areia utilizada foi do tipo natural de leito de rio. As exigências que foram seguidas estão descritas nas normas ABNT NBR 16916 (2021), ABNT NBR 16972 (2021) e ABNT NM 248 (2003), visando atender ao ensaio de caracterização e granulometria executados no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

A areia foi utilizada no estado seco, porém foi-se considerada a absorção de água a fim de atingir a condição saturada superfície seca. O cálculo para estipular esse parâmetro foi obtido atrás da norma ABNT NBR 16916 (2021). A determinação da relação água cimento (a/c) foi feita considerando o conteúdo efetivo de água, além de seguir as exigências da norma ABNT NBR 12655 (2015).

Já os agregados graúdos foram retirados de uma jazida na cidade de Bento Gonçalves e são de origem basáltica. Através da norma ABNT NBR 16917 (2021), pode-se definir a massa específica do agregado, já a granulometria foi feita a partir da ABNT NBR NM 248 (2003) e a massa unitária foi definida seguindo as exigências da norma ABNT NBR 16972 (2021).

Os resultados dos agregados miúdos obtidos a partir dos ensaios de laboratório para a massa unitária, massa específica saturada superfície seca e absorção estão apresentados na Tabela 13. Em seguida, no Gráfico 2, a curva granulométrica do agregado miúdo juntamente com as comparações normativas quanto aos limites propostos na NBR 7211 (2019).

Tabela 13 - Resultados de massa unitária, massa específica saturada superfície seca e absorção do agregado miúdo

Ensaio	Resultado
Absorção (%)	0,83
Massa unitária (g/cm ³)	1,60
Massa específica saturada superfície seco (g/cm ³)	2,51
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	1,34

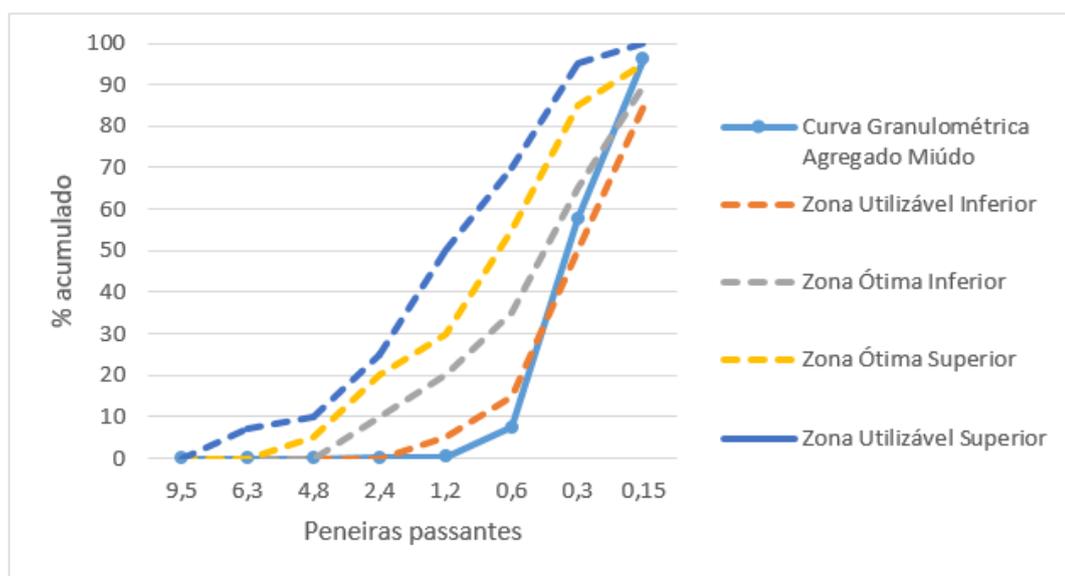
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira	Peso Retido			Percentuais		
	1ª Medição	2ª Medição	Média	% retido em cada peneira	% acumulado	% que passa na peneira
19	0	0	0	0	0	0
12,5	0	0	0	0	0	0
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,8	0,3	0	0,15	0,043	0,043	99,957
2,4	0,4	0,1	0,25	0,071	0,114	99,886
1,2	0,6	0,7	0,65	0,186	0,300	99,700
0,6	20,8	29,1	24,95	7,133	7,433	92,567
0,3	168,8	183,6	176,2	50,372	57,804	42,196
0,15	144,2	124,6	134,4	38,422	96,226	3,744
Fundo	14,7	11,7	13,2	3,774	100	0
TOTAL			349,8	100		

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 2 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo



Fonte: Elaborado pela autora

Já para os agregados graúdos, os resultados encontrados para a massa unitária, massa específica saturada superfície seca e agregado seco e absorção estão

compiladas na Tabela 15. A distribuição granulométrica do agregado graúdo está apresentada na Tabela 16 e, no Gráfico 3, a curva granulométrica.

Tabela 15 - Massa unitária, massa específica saturada superfície seca e agregado seco e absorção do agregado graúdo

Ensaio	Resultado
Absorção	1,77
Massa unitária (g/cm ³)	1,10
Massa específica saturada superfície seco (g/cm ³)	2,88
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,83

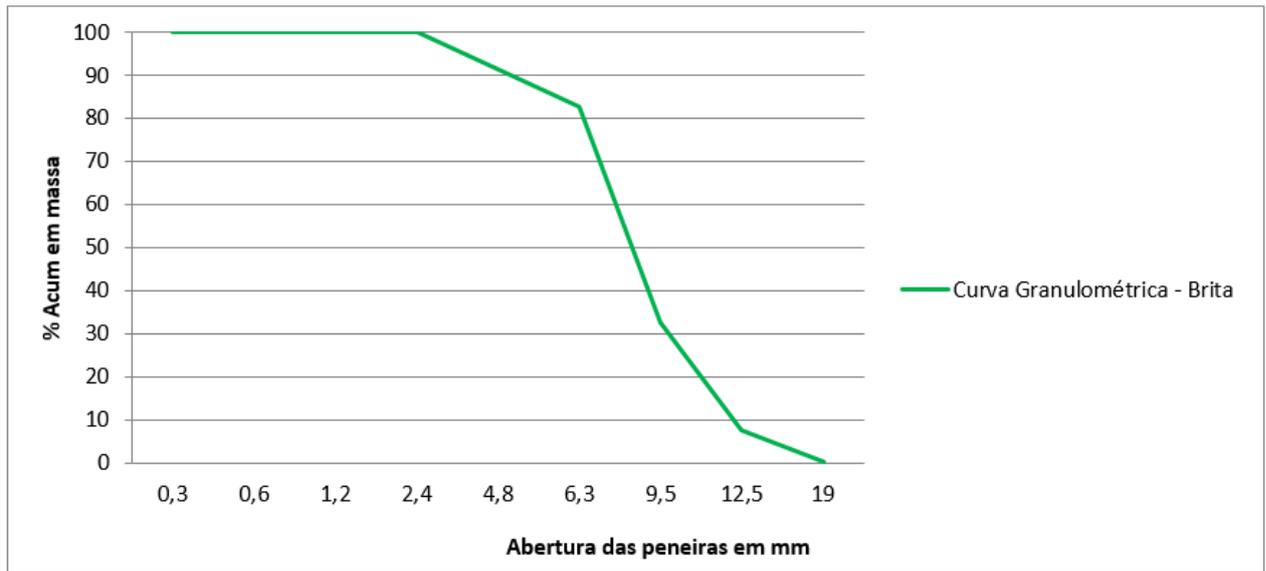
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 16 – Distribuição Granulométrica do Agregado Graúdo

Peneira	Peso Retido			Percentuais		
	1ª Medição	2ª Medição	Média	% retido em cada peneira	% acumulado	% que passa na peneira
19	16,2	0	8,1	0,162	0,162	99,838
12,5	619,5	135,4	382,06	7,643	7,805	92,195
9,5	1068,9	1400,5	1239,31	24,791	32,596	67,404
6,3	2082,1	2908,1	2499,71	50,004	82,600	17,400
4,8	462,1	405,6	437,46	8,751	91,351	8,649
2,4	0	0	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0	0	0
0,15	0	0	0	0	0	0
Fundo	723,1	141,6	432,35	8,649	100	0
	TOTAL		4998,99	100		

Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo



Fonte: Elaborado pela autora

3.1.3 Resíduo

O resíduo utilizado nesse estudo é oriundo do processo de beneficiamento de rochas ornamentais. O resíduo foi obtido junto a empresa DONADELLO rochas ornamentais, da cidade de São Sebastião do Caí. A empresa atua com mármore, granito e basalto, com mais de 15 anos de história.

Figura 14 – Empresa responsável pela doação do resíduo



Fonte: Registrado pela autora

No dia da coleta do resíduo, 22 de março de 2022, o mesmo encontrava-se em um tonel tampado, ao ar livre e o resíduo foi decorrente da etapa corte da mamoraria. As condições do material estão representadas na imagem a seguir.

Figura 15 – Condições do resíduo no dia da coleta



Fonte: Registrado pela autora

Para a caracterização do resíduo de beneficiamento de rochas, foram utilizados alguns métodos, o da massa específica, área superficial (BET), granulometria a laser e fluorescência de raios X (FRX). Todos os ensaios foram realizados na Unisinos, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat).

3.1.4 Aditivo

Para o ajuste correto do abatimento do concreto e sua consistência, foi-se incorporado o aditivo superplastificante Glenium S1 do fabricante Basf. O mesmo foi disponibilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção da universidade.

3.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Na sequência, e conforme a bibliografia, foram definidos teores de uso a serem adicionados em relação à massa de cimento nas matrizes de concreto.

Para análise do efeito da inserção do resíduo no concreto, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, bem como, ensaios no estado fresco e endurecido do concreto, conforme descrevem-se nos próximos itens.

3.2.1 Escolha do traço utilizado

O traço utilizado para a concretagem dos corpos de prova foi um traço já pré dimensionado em um estudo realizado pelo IBRACON em 2020 onde foi feita a dosagem conforme o método IPT/EPUSP. A relação a/c, nesse caso, a/a foi definida através da norma NBR 12655. A adição de um superplastificante se deu após o primeiro ensaio de Tronco de Cone dar um abatimento menor que o desejado e uma menor trabalhabilidade para o concreto.

Para a execução dos quatro tipos de concreto, alguns parâmetros foram levados em consideração:

- a) Teor de argamassa de 50,90%;
- b) H de 8,98%;
- c) 25MPa;
- d) Relação a/a de 0,60.

3.2.2 Implementação e execução do concreto

Para a execução dos quatro traços oficiais, partiu-se de um traço referencial, mencionado no item 4.2.1 e, em seguida, a implementação do resíduo aos três traços seguintes, seguinte sempre a mesma proporção do restante dos materiais – agregados graúdo e miúdo, água e aditivo. A Tabela 18 apresenta os dados utilizados para compor a execução dos concretos.

Como o estudo foi realizado para verificar o comportamento da substituição do aglomerante pelo resíduo, a a/c passa a ser analisada como a/a, mantendo, assim, a mesma relação de água para todos os traços no valor de 0,60, conforme o limite máximo exigido pela norma NBR 12655 (2015) para classe de agressividade II para concreto. Sendo assim, para o cálculo da quantidade de água utilizada, considerou-se o total de aglomerantes e não somente a quantidade de cimento existente em cada um dos três traços. Os abatimentos dos concretos foram ajustados com o auxílio do aditivo e todos se enquadraram na classe S100 seguindo a NBR 5738 (2015).

Tabela 17 – Nomenclatura e definição dos traços

Nomenclatura	Definição
T1 - REF	Traço referência com 0% de substituição de resíduo, apenas cimento.
T2 – 5%	Traço com 5% de substituição de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas.
T3 – 10%	Traço com 10% de substituição de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas.
T4 – 15%	Traço com 15% de substituição de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas.

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 18 – Composição dos traços para moldagem dos corpos de prova

Traço	Aglomerante	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Beneficiamento de Rochas	a/a	Aditivo (%)
T1 – REF	1	2,4	3,28	-	0,60	0,0035
T2 – 5%	0,95	2,4	3,28	0,05	0,60	0,0035
T3 – 10%	0,90	2,4	3,28	0,10	0,60	0,0035
T4 – 15%	0,85	2,4	3,28	0,15	0,60	0,0035

Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, foram moldados 16 corpos de prova para cada traço, totalizando 64 amostras de concreto para a realização dos ensaios seguintes.

Figura 16 – Imagens dos corpos de prova concretados



Fonte: Registrado pela autora

3.2.3 Ensaio de caracterização

3.2.3.1 Granulometria

Para a caracterização da granulometria dos agregados graúdos e miúdos, foi feita a determinação da curva granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica através da norma regente NBR NM 248 (2003). Já para o aglomerante, juntamente com o resíduo, a análise foi feita através do ensaio de granulometria por difração a laser realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat).

3.2.3.2 Massa específica

Para a determinação da massa específica dos agregados graúdos o método utilizado está descrito na norma NBR 16917 (2021). Já para os agregados miúdos, a norma vigente é a NBR 16916 (2021). Para o aglomerante e o resíduo, a determinação da massa específica foi executada através da técnica de picnometria a gás hélio. O estudo foi feito no LCVMat.

3.2.3.3 Massa unitária

Para a caracterização da massa unitária dos materiais, foi-se utilizado o método A descrito pela norma NBR 16972 (2021).

3.2.3.4 Fluorescência de raios – X

Esse ensaio tem como finalidade identificar a proporção de elementos existentes na amostra em estudo, bem como quais elementos estão presentes na sua composição. É baseado na emissão de raios raios-x e na produção de radiação fluorescente. O ensaio foi realizado no laboratório LCVMat da Unisinos.

3.2.3.5 Área Superficial por BET- Brunauer, Emmett e Teller

O ensaio de área superficial tanto do resíduo quanto do aglomerante baseou-se pelo método de absorção de nitrogênio BET (Brunauer, Emmett e Teller). A realização da análise foi feita no laboratório LVCMat.

3.2.4 Ensaio no estado fresco

3.2.4.1 Determinação da consistência

O ensaio para a determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone foi feito seguindo as normas regidas pela NBR 16889 (2020). O método de adensamento foi o manual classificados como S100 obtendo abatimentos de $100 \leq A < 160$ mm segundo a NBR 5738 (2015).

3.2.5 Ensaio no estado endurecido

3.2.5.1 Resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em conformidade com a norma ABNT NBR 5739, considerando quatro idades de análise - 7 dias, 19 dias, 26 dias e 56 dias – sendo utilizados para os ensaios três corpos de prova por traço. A aplicação de carga se deu em uma prensa universal localizada no LMC.

Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 10mm de diâmetro e 20mm de altura e, após 24 horas, foram desmoldados e armazenados na sala de cura úmida até a idade do ensaio. Suas duas faces foram retificadas previamente para obter-se uma maior planeza entre as faces.

Figura 17 – Ensaio de compressão dos corpos de prova



Fonte: Registrado pela autora

3.2.5.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi executado conforme a norma ABNT NBR 8802, 2019. O número de corpos de prova foi de três exemplares para cada traço (REF, 5%, 10% e 15%). Para esse ensaio, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura nas idades de 7, 19, 28 e 56 dias. Em cada corpo de prova foram feitas duas medições. O ensaio consiste em posicionar os dois transdutores nas duas faces do CP para obter-se o valor da propagação de ondas ultrassônicas entre eles.

Figura 18 – Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas nos corpos de prova



Fonte: Registrado pela autora

3.2.5.3 Determinação da resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica foi feito a partir do método dos quatro eletrodos – método de Wenner. Para a realização desse ensaio foram utilizados corpos de prova com dimensões de 10cm de diâmetro por 20 cm de altura nas idades de 7, 19, 28 e 56 dias para os quatro traços estudados.

Foram ensaiados três CPs por traço e feitas três medições em cada um, a fim de obter-se uma média e maior precisão no resultado.

Figura 19 – Ensaio de resistividade elétrica nos corpos de prova



Fonte: Registrado pela autora

3.2.5.4 Ensaio de absorção total de água, índice de vazios e massa específica real

O ensaio foi realizado conforme as instruções da NBR 9778, 2009. Aos 56 dias, foram utilizados dois corpos de prova para cada traço, obtendo-se assim, um total de oito CPs ensaiados.

3.2.5.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio foi realizado aos 56 dias de cura, conforme a NBR 9779, 2012. Durante o ensaio, as partes inferiores dos corpos de prova foram imersos na água cerca de 5 ± 1 mm e, assim, foi-se verificando e medindo a massa saturada ao decorrer de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Após essa etapa de medições, foi feito o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, seguindo a NBR 7222, 2011 com o intuito de verificar a distribuição de água dentro dos CPs.

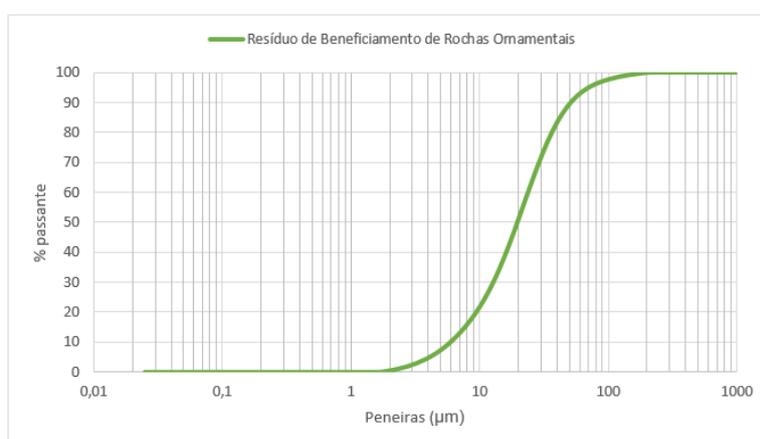
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, são analisados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais, bem como, comparações com as bibliografias já existentes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O Gráfico 4 representa a curva granulométrica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. Na Tabela 19 apresenta-se sua composição química.

Gráfico 4 – Curva Granulométrica do Resíduo



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 19 – Composição e Quantificação do Resíduo (resultados ensaio de FRX)

Composição Química	Quantidade de material (%)
<i>Na₂O</i>	1,573
<i>MgO</i>	1,475
<i>Al₂O₃</i>	8,063
<i>SiO₂</i>	41,141
<i>P₂O₅</i>	0,503
<i>K₂O</i>	2,414
<i>CaO</i>	6,698
<i>TiO₂</i>	0,989
<i>MnO</i>	0,080
<i>Fe₂O₃</i>	5,344
<i>L. O. I</i>	4,666

Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, obtiveram-se os valores de massa específica de 2,76 g/cm³ e 1,38 g/cm³ de área superficial. Segundo um estudo feito por Degen et. al. (2013) sua área superficial se manteve em 0,82 m²/g o que acarretou uma redução da resistência à compressão de seus corpos de prova aos 28 dias se comparado aos resultados obtidos no item 4.3.1. desse estudo de área superficial maior.

Para os resultados obtidos após o ensaio de fluorescência de raios X, é possível evidenciar, segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), que o resíduo em estudo não pode ser considerado um material pozolânico, pois sua composição de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ atingiu o valor de 54,5% e para ser considerado pozolânico é necessário ter, no mínimo, o total de 70% entre os três elementos. Para Teixeira et. al. (2020), o resultado obtido foi semelhante, cerca de 62,4%, também classificado como não pozolânico.

Os teores de SiO₃ e Al₂O₃ encontrados se destacam pelo alto percentual, 41,10% e 8,10% respectivamente. Sato et. al. (2018) e Teixeira et. al. (2020) obtiveram resultados consideravelmente altos e semelhantes aos encontrados pelo resíduo em estudo, 66,80% e 34,01%, respectivamente para SiO₃ e 13,50% e 18,77% para Al₂O₃.

É possível destacar, ainda, a quantidade de óxido de sódio e potássio (Na₂O e K₂O) existentes na composição do resíduo, elementos considerados álcalis e que afetam diretamente a velocidade do ganho de resistência. Em comparação à quantidade encontrada na Tabela 12 do cimento a diferença pode ser considerada relevante. Para o resíduo os valores de Na₂O e K₂O são, respectivamente, 1,57% e 2,41%, já no cimento utilizado, os valores encontrados foram de 0,16% e 1,18%.

4.2 ESTADO FRESCO

4.2.1 Determinação da consistência – abatimento

Os resultados obtidos após serem feitos os ensaios de abatimento de tronco de cone são apresentados na tabela 4. As imagens ilustram os ensaios, bem como os valores obtidos para cada ensaio. Para o traço 1 – Referência, foram feitos dois ensaios, um sem utilizar aditivo e o outro com o acréscimo do aditivo.

Figura 20 – Resultado dos ensaios de abatimento dos quatro traços



Fonte: Registrado pela autora

Tabela 20 – Resultados obtidos após ensaio de abatimento

TRAÇO	ABATIMENTO	UNIDADE
T1 – REF – Sem aditivo	70	mm
T1 – REF – Com aditivo	120	mm
T2 – 5%	140	mm
T3 – 10%	140	mm
T4 – 15%	150	mm

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a Tabela 20, o traço referência, inicialmente, obteve um resultado de abatimento classificado conforme a NBR 16889 (2020) como S50, sem o uso de aditivos. Com isso, foi-se adicionado um aditivo superplastificante na mistura em baixas porcentagens (0,0035%) e, conseqüentemente, inseridos nos outros três traços existentes a fim de ser analisado na composição dos concretos apenas as diferentes porcentagens de cimento substituído pelo resíduo.

Segundo Bacarji et al (2013) e Gesoğlu et al (2012), as substituições de cimento por resíduos de mármore e granito alteram pouco a trabalhabilidade do concreto, podendo ser consideradas praticamente insignificantes. Sendo assim, percebe-se que as variações entre os valores de abatimento atingidos não possuem grandes variações e enquadram-se de acordo com a norma alusiva na classe S100 com abatimentos entre 100 e 160mm.

Ao analisar as imagens da Figura 20, pode-se perceber que há uma diferença de consistência e fluidez entre o concreto do traço T1 – REF – sem aditivo e o T1 – REF – com aditivo. Já os demais traços se mantiveram com boa coesão e acabamento e abatimento dentro do esperado, realmente indicando a não influência do resíduo neste parâmetro.

Importante destacar, no entanto, que há uma importante variação nos valores de área superficial, de 2,09 m²/g para o cimento e 1,38 m²/g para o resíduo estudado, o que impacta na demanda de água e na fluidez da amostra. Através do ensaio de fluorescência de raios X foi-se possível destacar o aumento significativo de SiO_2 e Al_2O_3 na composição do resíduo que está diretamente ligado a hidratação da pasta e, conseqüentemente, ao abatimento por conta do consumo de água.

4.3 ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à Compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram analisadas as idades de 7, 19, 28 e 56 dias e ensaiados três corpos de prova para cada idade e traço. Para apresentar os resultados obtidos, a Tabela 21 exemplifica um compilado das resistências potenciais, sendo elas os maiores valores obtidos dentre as amostras e as resistências médias entre os três exemplares.

Tabela 21 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão

TRAÇO	IDADE	<i>F_c, med (MPa)</i>	<i>F_c, pot (MPa)</i>
T1 - REF	7 dias	15,5	15,9
T2 – 5%	7 dias	13,7	14,1
T3 – 10%	7 dias	12,6	12,8

T4 – 15%	7 dias	10,5	10,8
T1 - REF	19 dias	23,1	23,3
T2 – 5%	19 dias	17,2	17,5
T3 – 10%	19 dias	16,4	16,6
T4 – 15%	19 dias	14,4	14,6
T1 - REF	28 dias	25,1	25,5
T2 – 5%	28 dias	21,5	21,9
T3 – 10%	28 dias	20,2	20,9
T4 – 15%	28 dias	16,5	17,1
T1 - REF	56 dias	32,4	32,6
T2 – 5%	56 dias	25,0	25,3
T3 – 10%	56 dias	23,0	23,5
T4 – 15%	56 dias	20,8	20,9

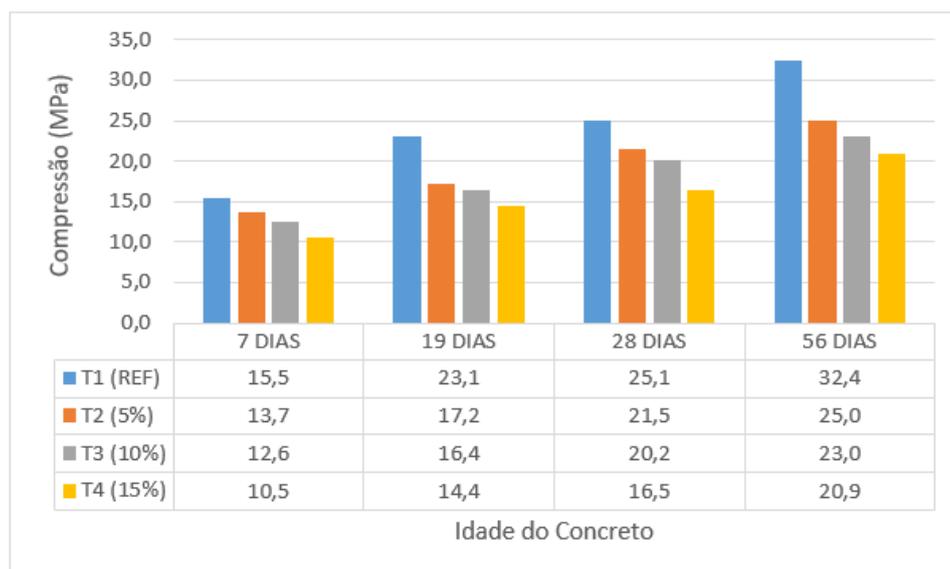
Fonte: Elaborado pela autora

Segundo a norma NBR 6118 (2014), a resistência do concreto para uso em com classe de agressividade II (moderada), deve ser de 25 MPa. Sendo assim, aos 28 dias, apenas o traço REF atingiu o valor desejado inicialmente. Os traços T2 – 5% e T3 – 10% obtiveram uma resistência de 14,0% e 19,2%, respectivamente, inferior aos 25MPa.

Aos 56 dias, o traço T1 – REF apresentou um elevado crescimento na resistência de cerca de 29,08% em relação aos 28 dias. Já os demais traços estabeleceram um aumento de aproximadamente 4 MPa e, apenas o T2 – 5% obteve uma resistência de 25 MPa com um aumento de 16,28%. O T3 – 10% e T4 – 15% resultaram em resistências menores que o desejado com um crescimento de 13,86% e 26,06%, respectivamente em relação aos 28 dias.

O Gráfico 5 apresenta as variações de cada traço ao decorrer dos quatro dias de ensaio.

Gráfico 5 – Resultado do Ensaio de Compressão dos Quatro Traços



Fonte: Elaborado pela autora

Após verificar os resultados obtidos através do Gráfico 5, nota-se um crescimento constante nos quatro traços analisados ao longo dos 56 dias individualmente. Entretanto, a substituição de cimento pelo resíduo resultou em uma redução de resistência considerável podendo-se perceber que o teor 15% e a idade de 56 dias foram a combinação de maior redução em comparação ao T1 – REF.

Todos os traços obtiveram crescimentos lineares de resistência e, comparando-os, entre as idades inicial e final dos ensaios tem-se, para cada traço T1 – REF, T2 – 5%, T3 – 10% e T4 – 15% um aumento de 109,03%, 82,48%, 82,54% e 99,05% respectivamente. Ao mesmo tempo que há uma evolução em cada traço individualmente, há uma relação entre os traços com substituição de cimento pelo resíduo e o traço referência. Existe uma diminuição de resistência entre os quatro traços em cada uma das idades, aos 7 dias, por exemplo, existe uma diferença de 32,26% entre o T1 e o T4. A substituição com maior queda é a de 15%, uma possível causa para isso é a diminuição dos principais compostos formados após a hidratação C_3S e um aumento da zona de transição entre o agregado e a pasta (ALIABDO et. al., 2014).

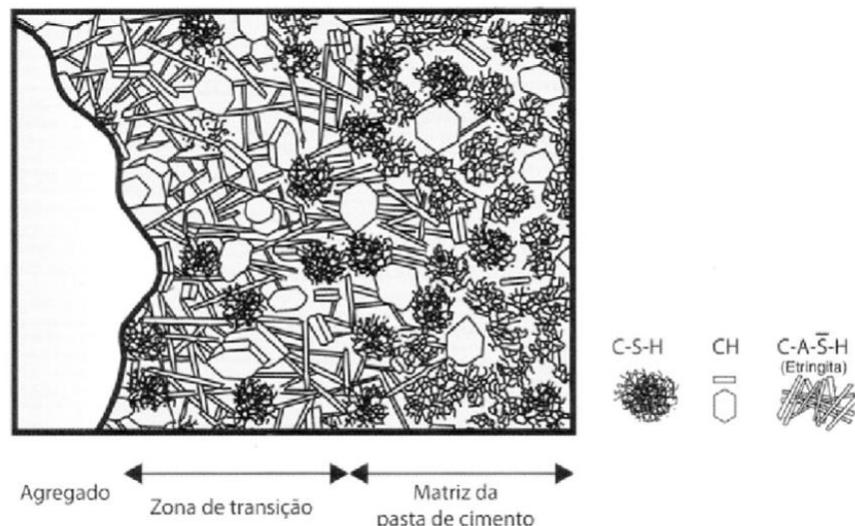
A diferença encontrada entre os resultados obtidos dos três traços com substituição e o traço referência é que nenhum conseguiu atingir o traço inicial (sem utilização de resíduo). Para Egün (2011) a relação a/c ou a/a interfere na resistência do concreto, para uma a/a de 0,50, os teores de substituição de 5% e 7,5% superaram

os valores encontrados no traço referencial enquanto os resultados de 15% de substituição diminuíram a resistência do concreto. Já para Kumar et al (2020), com uma relação de a/a de 0,45 as resistências de 5% e 10% de substituição excederam o resultado do traço referência. Ou seja, quanto menor a relação a/a melhores são os resultados encontrados para a resistência das amostras. Já para o caso desse estudo, como a relação a/a é de 0,60 a resistência à compressão não ultrapassou o traço referencial.

Ainda assim, podem ser mencionados, conforme a literatura, resultados semelhantes aos encontrados no presente trabalho. Para Bacarji et al (2013), todos os três traços com substituição (5, 10 e 20%) com relação de a/c de 0,65 não ultrapassaram a resistência do traço referência, por conta da quantidade de água presente no concreto e influência dela na porosidade do concreto, como também, por conta do empacotamento das partículas do concreto.

Uma justificativa plausível para a redução da resistência dos concretos é a concentração de poros na interface entre o agregado e a pasta de cimento denominada como zona de transição. Uma das características mais prejudiciais para a interface entre agregado/pasta é a relação a/c ou a/a, pois quanto mais água encontra-se no concreto, maiores os riscos de exsudação de água e formação do efeito parede (TUTIKIAN et. al, 2011). A Figura 21, de Mehta e Monteiro (2014) apresenta a representação esquemática da zona de transição do concreto.

Figura 21 – Representação da Zona de Transição do Concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

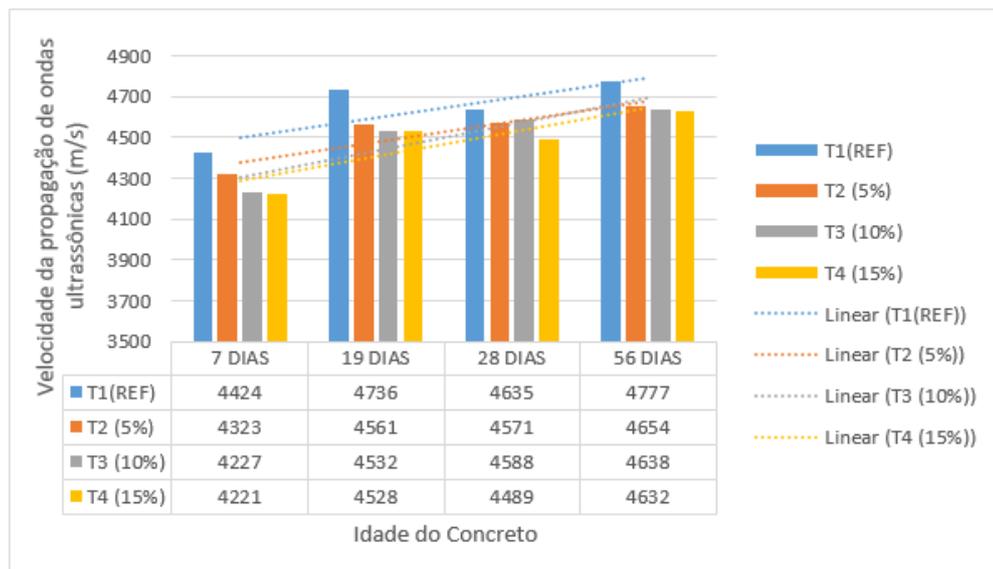
Como demonstrado na Figura 21, existem três tipos de partículas existentes tanto na zona de transição entre pasta/agregado como também na pasta de cimento, sendo eles o C-S-H, CH e etringita. O hidróxido de cálcio e a etringita crescem em grandes poros o que faz com que a zona de transição, por ser um local poroso, abrigue uma quantidade considerável (NETO E DJANIKIAN, 1995).

A formação dessas partículas acontece quando a hidratação nas idades iniciais ocorre através da liberação de íons por dissolução e precipitação e, com isso, são formados os silicatos, aluminatos, cálcios e hidroxilas que formam a cristalização dos hidratos que formam novos compostos que se precipitam e formam os silicatos hidratados, aluminatos e hidróxidos de cálcio (MEHTA E MONTEIRO, 2014) importantes para a formação de C-S-H. Pode-se perceber que nos resultados apresentados no item 4.1 os valores obtidos do resíduo possuem grandes quantidades de sílica e alumina responsáveis pela hidratação do C-S-H.

4.3.2 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas

O Gráfico 6 apresenta os resultados obtidos nas quatro idades (7, 19, 28 e 56 dias) das médias das três leituras realizadas no ensaio.

Gráfico 6 – Resultados do Ensaio de Propagação de Ondas Ultrassônicas



Fonte: Elaborado pela autora

Nessa análise, dois pontos são importantes de serem mencionados, no T1 – REF entre as idades de 19 e 28 dias ocorreu uma diminuição das velocidades

encontradas, bem como no T4 – 15% nas mesmas idades. Desconsiderando esses dois pontos, os resultados do restante dos ensaios se mantiveram lineares. Essa diferença encontrada possui um efeito insignificante e os resultados apresentados foram semelhantes aos encontrados por Aliabo et. al (2014). O estudo realizado por Qiao et. al. (2019), apresentou as mesmas características no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas onde seus resultados foram decrescendo à medida que o concreto possuía mais dias de cura e maior hidratação.

Segundo a NBR 8802 (2013), o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é utilizado para verificar a homogeneidade do concreto, bem como, evidenciar vazios e falhas ao decorrer da concretagem da amostra. A norma não possui uma classificação de resultados, entretanto, para ser evidenciada uma classificação entre os resultados encontrados a Tabela 22 apresenta segundo a IS 13311-92 e Cánovas (1988), as qualidades de concreto conforme a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Tabela 22 – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas: qualidade do concreto segundo IS 13311-92 e Cánovas (1998)

Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas	Qualidade do Concreto pela IS 13311-92	Qualidade do Concreto por Cánovas (1988)
Acima de 4500	Excelente	Excelente
3500 – 4500	Boa	Ótimo
3000 – 3500	Média	Bom
Inferior a 3000	Duvidosa	-
2000 – 3000		Regular
Inferior 2000		Ruim

Fonte: Pacheco (2016)

Considerando o exposto, os traços T1 – REF, T2 – 5% e T3 – 10%, na idade de 28 dias, encontraram-se com velocidades acima de 4500 m/s, sendo assim, classificados como excelentes, entretanto, o T4 – 15% foi classificado como bom devido a sua velocidade se encontrar entre 3500 e 4500 m/s. Aos 56 dias, os resultados obtidos indicam que todos os traços, sem exceção, são categorizados como excelentes.

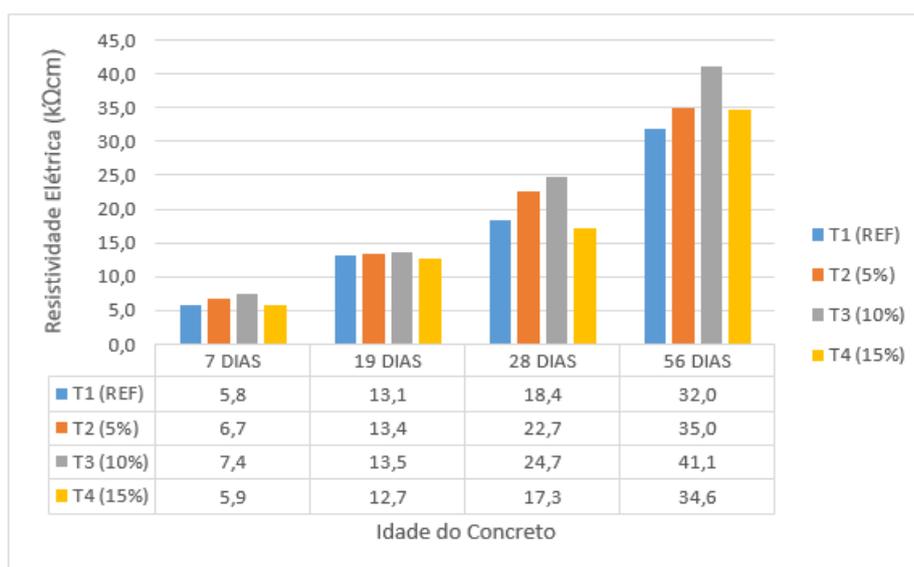
Além disso, comparando os traços T1 – REF e o T3 – 10% aos 56 dias, é possível constatar que, à medida que aumentam as substituições de cimento pelo

resíduo, menores os resultados das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas, bem como, de resistência à compressão. Esse fato ocorre por conta de que ambos resultados estarem relacionados com a quantidade de água existente no concreto.

4.3.3 Resistividade Elétrica

No ensaio de resistividade elétrica, foram analisadas 3 amostras por traço nas idades de 7, 19, 28 e 56 dias totalizando 12 corpos de prova. Para cada amostra foram realizadas três medições a fim de obter-se uma média para cada corpo de prova. O Gráfico 7 apresenta a média dos resultados obtidos nas diferentes idades do concreto.

Gráfico 7 – Resultados do Ensaio de Resistividade Elétrica



Fonte: Elaborado pela autora

Percebe-se que a idade de 19 dias foi a mais apresentou similaridade entre os resultados, todos muito próximos. Já aos 28 dias é perceptível um aumento considerável da resistividade nos traços T2 – 5% e T3 – 10%.

A resistividade aumenta à medida que ocorre a densificação das microestruturas. É um parâmetro utilizado para relacionar a quantidade de água existente na matriz e a porosidade, ou seja, os produtos hidratados preenchem os microporos para reduzir a porosidade e, conseqüentemente, aumentar a resistividade (CHEN, CHANG; YEIH, 2014). Sendo assim, é possível evidenciar que todos os traços (em uma comparação individual) obtiveram um aumento de resistividade ao decorrer

dos 56 dias. Entretanto, como, ao decorrer dos dias de ensaio e o aumento dos teores de substituição de cimento pelo resíduo os resultados apresentaram valores abaixo do T1 – REF, é possível que, ao longo do tempo, os poros foram se preenchendo (CADORE, 2021), resultados importantes de serem relacionados aos obtidos de índices físicos nos itens 4.3.4.

Segundo Chao-Lung et. al. (2011) a resistividade aumenta à medida que ocorre a diminuição do volume de poros do concreto. Para Woelf e Lauer (1979, apud Lencioni, 2011), outro fator que influencia diretamente na resistividade é a quantidade de água empregada na mistura. Dessa maneira, através dos resultados obtidos para índice de vazios e absorção de água, nos itens 4.3.4.1 e 4.3.4.2, pode-se apresentar a relação com a resistividade elétrica por conta de que, aos 56 dias, por exemplo, a medida que as resistividades dos corpos de prova aumentavam, a absorção de água e índice de vazios diminuía comprovando a existência de menor porosidade e água existentes no concreto.

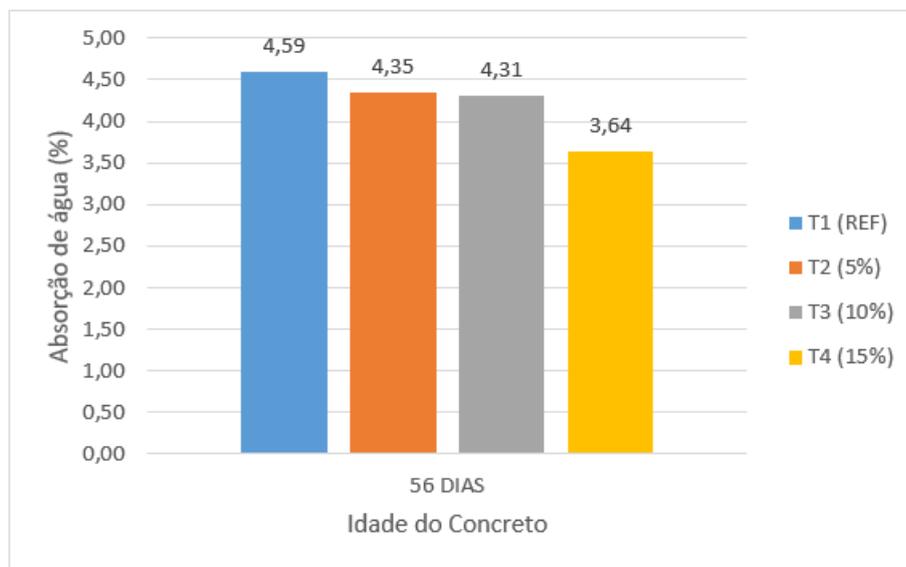
Importante mencionar, ainda, o comportamento do T4 – 15% que destoou dos demais em todas as idades de ensaio.

4.3.4 Absorção Total de Água, Índice de Vazios e Massa Específica Real

4.3.4.1 Absorção Total de Água

O Gráfico 8 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água aos 56 dias de idade para as amostras dos quatro traços em estudo.

Gráfico 8 – Resultados do Ensaio de Absorção Total de Água



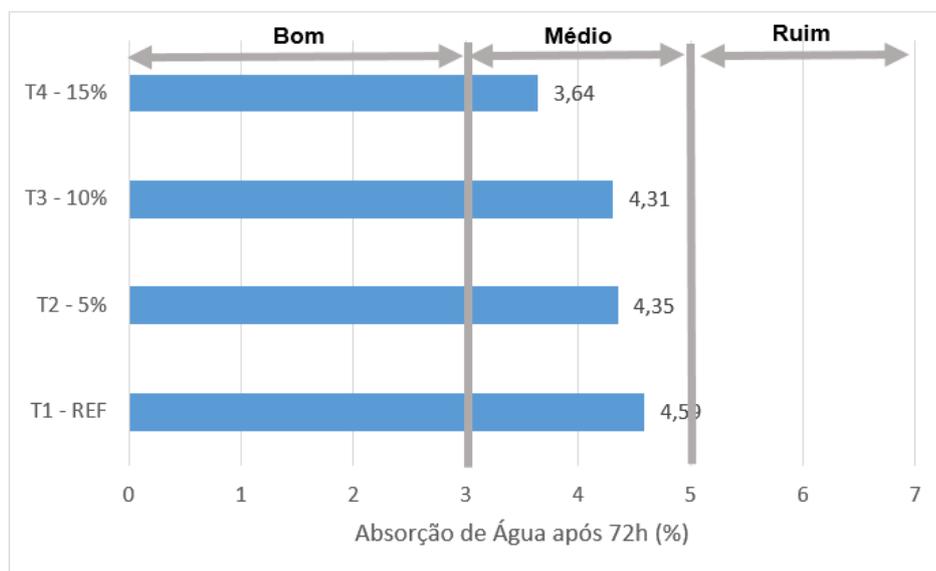
Fonte: Elaborado pela autora

A idade de ensaio pode afetar diretamente os resultados obtidos do ensaio de absorção de água e ar incorporado, uma vez que, com o aumento da hidratação do cimento, é reduzida a porosidade da amostra (HELENE, 1993).

Segundo Rashwan et. al (2020), existe um aumento da absorção de água enquanto há uma redução da densidade aparente com o aumento da substituição de resíduo. Já para os resultados obtidos, esse fato não pode ser comprovado nos resultados apresentados no Gráfico 8, pois, quanto maior a porcentagem de substituição de cimento por resíduo, menor a absorção de água existente no concreto.

Segundo o Comité Euro – Internacional du Betón (CEB 192, 1989), existente uma classificação qualitativa do concreto quanto ao nível de absorção após as 72h de ensaio. O Gráfico 9 apresenta a comparação com os resultados obtidos.

Gráfico 9 – Absorção de água e qualidade do concreto de acordo com critérios da CEB 192 (1989)



Fonte: Adaptado de CEB 192 (1989)

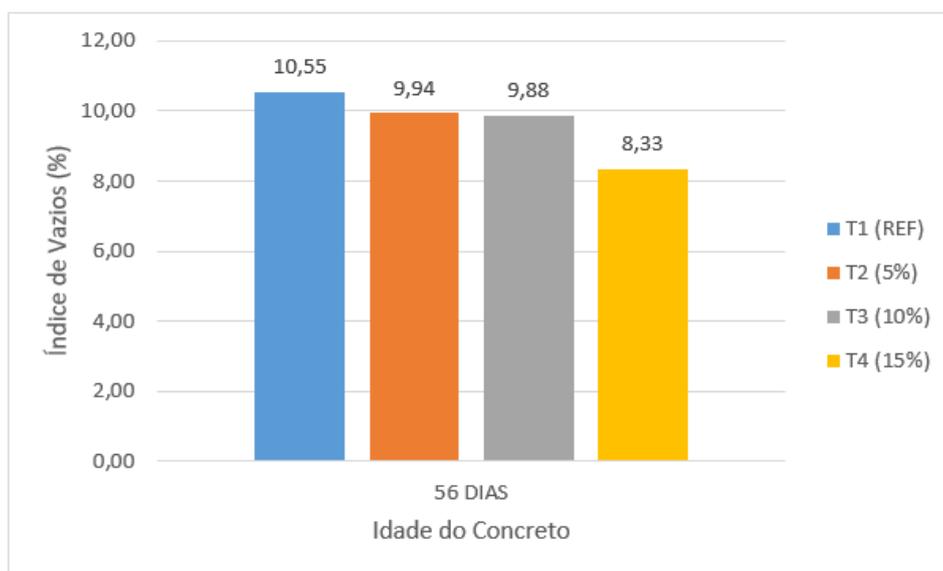
Sendo assim, pode-se observar que os valores obtidos de absorção de água para todos os traços estão na faixa entre 3 e 5%, classificados como medianos quanto a qualidade do concreto.

Ademais, os resultados de absorção de água estão diretamente relacionados aos resultados de resistividade elétrica, uma vez que a água absorvida pela microestrutura do concreto faz com que aumente a condutividade elétrica, e, conseqüentemente, reduza a resistividade elétrica (MEDEIROS – JUNIOR et. al., 2019). Nesse caso, pode-se observar que a medida que a porcentagem de absorção de água foi diminuindo nos quatro traços, a resistividade aumentou.

4.3.4.2 Índice de Vazios

O ensaio de índice de vazios foi realizado aos 56 dias de idade para os quatro traços. O Gráfico 10 apresenta os resultados obtidos.

Gráfico 10 – Resultado do Ensaio de Índice de Vazios



Fonte: Elaborado pela autora

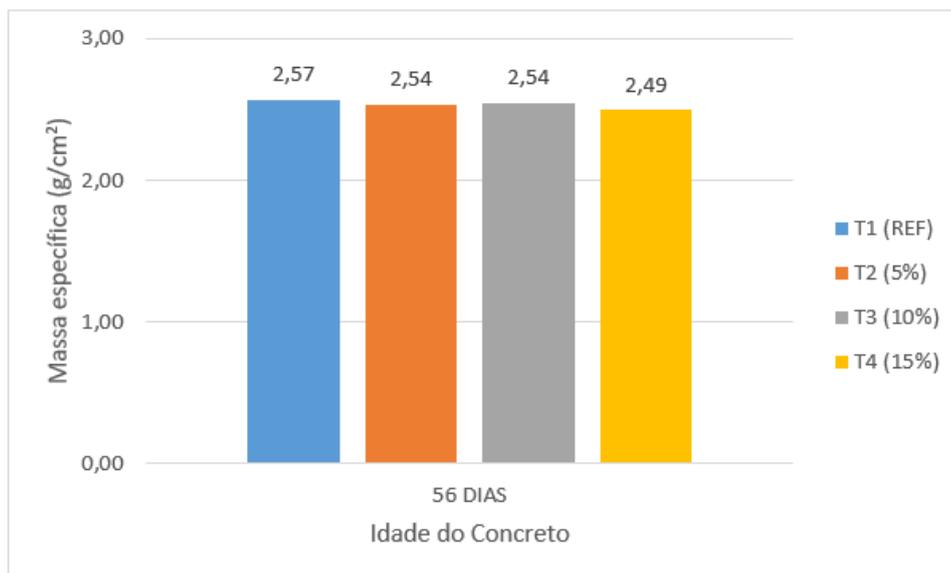
Assim como apresentado no ensaio de absorção de água total (item 4.3.4.1), à medida que ocorrem as substituições de cimento pelo resíduo, os índices de vazios diminuem, evidenciando, assim, uma, lógica entre os ensaios. Sendo assim, quanto menor absorção de água no concreto, menores os índices de vazios. Em comparação aos quatro traços, a redução de índice de vazios entre o T1 – REF e o T4 – 15% foi de cerca de 21,04%.

Para Abd Elmoaty (2013) e Rashwan et. al (2020) os resultados atingidos obtiveram comportamentos semelhantes. Pode-se justificar o ocorrido por conta do elevado valor de a/c ou a/a no traço.

4.3.4.3 Massa Específica Real

O ensaio para determinar a massa específica real do concreto dos quatro traços em estudo foi-se realizado aos 56 dias de cura. O Gráfico 10 apresenta os resultados obtidos após 72h de ensaio.

Gráfico 11 – Resultados do Ensaio de Massa Específica Real



Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtiveram uma coerência de quanto menores os valores substituídos, maiores as massas específicas. A diferença existente entre o T1 – REF e o T4 – 15% de substituição foi de 3,11%, valor esse considerado, praticamente, irrelevante. Assim sendo, conferem aos ensaios de absorção e índice de vazios uma correlação com a massa específica real dos concretos, pois a medida que foram diminuindo os resultados de absorção e índice de vazios com maiores valores de substituição de cimento pelo resíduo, a massa específica real dos concretos também decresceu.

Segundo a NBR 8953 (2015) existe uma classificação do concreto segundo sua massa específica. Os parâmetros utilizados são:

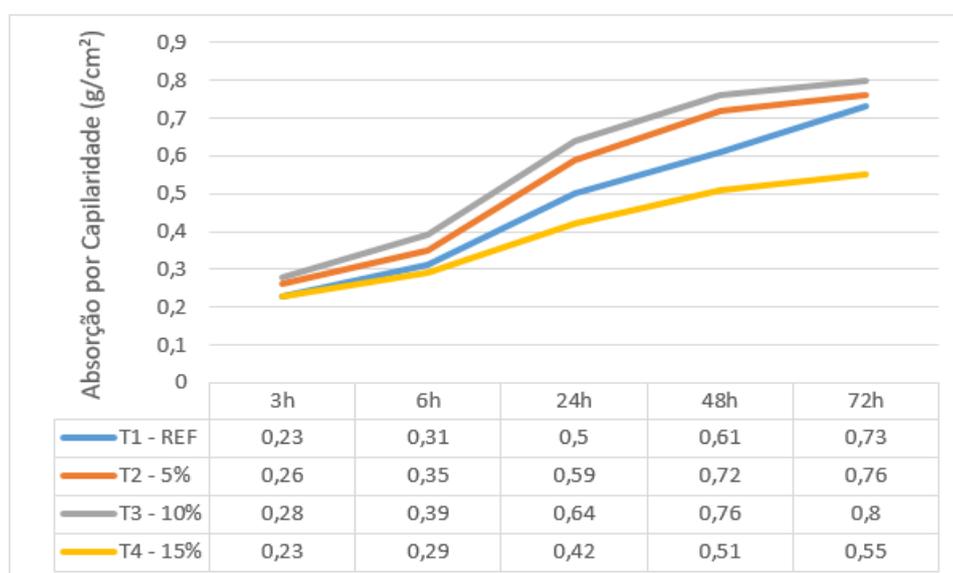
- Concreto normal (C): massa específica entre 2000kg/m³ e 2800kg/m³;
- Concreto leve (CL): massa específica inferior à 2000kg/m³;
- Concreto pesado ou denso (DC): massa específica superior à 2800kg/m³.

Sendo assim, após os resultados obtidos de massa específica seca, nos valores de 2295,8 kg/m³, 2283,5 kg/m³, 2291,6 kg/m³ e 2287,1 kg/m³ respectivamente, para os traços T1 – REF, T2 – 5%, T3 – 10% e T4 – 15% podem-se classificar como concretos normais, não havendo grande variação entre os traços.

4.3.5 Absorção de Água por Capilaridade

O Gráfico 11 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade, ensaio executado aos 56 dias de idade do concreto para os quatro traços analisados ao decorrer do estudo. Para cada traço, foram utilizados 3 corpos de prova para a realização do ensaio sendo analisada na fase final, a média entre os três resultados. As leituras foram analisadas em 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. O Gráfico 12 apresenta os resultados obtidos após as 72h.

Gráfico 12 – Resultados do Ensaio de Absorção por Capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora

A absorção de água por capilaridade está diretamente ligada à relação a/a, quanto maior a relação a/a maiores os resultados de capilaridade devido ao maior número de poros existentes no concreto (MEDEIROS – JUNIOR et. al, 2019). Segundo o Gráfico 12, pode-se perceber que, à medida que as amostras se aproximaram da capacidade máxima de absorção, apresentou-se uma tendência de estabilização dos resultados. A partir das 48h de ensaio, o comportamento dos concretos se manteve equilibrado e semelhantes. O T2 – 5% e o T3 – 10%, por exemplo, obtiveram um crescimento de 5,56% e 5,26%, respectivamente, uma margem muito pequena, podendo-se dizer que os concretos apresentaram uma estabilidade de absorção capilar.

Celik et. al. (1996), Ilangoonava et. al. (2008), Alli OO et. al. (2016) admitiram que, quanto maiores as substituições e adições de resíduo, maior a absorção de água por capilaridade e permeabilidade no concreto. Segundo Dobiszewska et. al. (2022), esse comportamento pode ser explicado pelos cloretos que causam a deterioração do concreto, uma vez que os íons cloreto penetram no concreto e substituem os íons hidróxidos durante a lixiviação. Por consequência, o pH da solução dos poros diminui ocorrendo a desintegração da matriz cimentícia estando diretamente conectada com porosidade capilar e permeabilidade. A difusão dos íons depende significativamente da estrutura dos poros capilares.

Destacando, ainda, que o T4 – 15% divergiu dos demais resultados a partir das 6h de ensaio.

4.3.5 Compilado dos Resultados

Na Tabela 24 estão apresentados uma síntese de todos os resultados obtidos para a execução desse trabalho.

Tabela 23 – Síntese de resultados obtidos aos 56 dias

Traço	Compressão (Mpa)	Ultrassônico (m/s)	Resistividade (Ωm)	Absorção (%)	Ind. Vazios (%)	Capilaridade
T1 – REF	32,4	4777	31,9	4,6	10,6	0,73
T2 – 5%	25,0	4654	35,0	4,4	10,0	0,76
T3 – 10%	23,0	4638	41,1	4,3	9,9	0,8
T4 – 15%	20,8	4632	35,0	3,6	8,3	0,55

Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os resultados obtidos, é possível fazer uma relação entre eles e destacar o T1 – REF como o que apresentou melhores resultados em todos os seis ensaios executados com uma resistência à compressão de 32,4 MPa. Os demais traços, T2 – 5%, T3 – 10% e T4 – 15%, apresentaram resultados positivos e lineares ao decorrer dos 56 dias, porém não ultrapassaram o traço referência. É possível destacar, ainda, que o T4 – 15% apresentou uma baixa resistência se comparado ao T1 – REF, não atingido o valor desejado inicialmente.

Para ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, os resultados foram os esperados com relação a resistência a compressão, já que, quanto maior a substituição de aglomerante pelo resíduo, menores os valores obtidos de resistência 73 e, conseqüentemente, de propagação de ondas ultrassônicas. Entretanto, fazendo-se uma comparação entre os resultados obtidos de resistência a compressão, propagação de ondas ultrassônicas, absorção e índice de vazios, pode-se perceber que não ocorreu uma relação entre resultados pois, à medida que ocorre a diminuição de resistência e velocidade de propagação de ondas, deveria, por consequência, aumentar o índice de vazios e absorção. Esse fato, porém, não foi evidenciado nos resultados obtidos entre os três ensaios conforme a Tabela 23.

Os ensaios de absorção total de água e índice de vazios se mantiveram semelhantes e com lógica entre si. Os resultados mostram que conforme aumenta a quantidade de resíduo no concreto, menores são as absorções de água e índice de vazios. Para ensaio de absorção por capilaridade, os resultados se mantiveram estabilizados o que se comprovou no Gráfico 12 em que, das 48h às 72h, o aumento da absorção de manteve padrão entre os quatro traços. Além disso, os resultados dos ensaios de índices físicos apresentaram concordância com os resultados obtidos para resistividade elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como finalidade analisar as características e parâmetros físicos e mecânicos da inserção de resíduo de beneficiamento de rochas no concreto convencional através da substituição de 5%, 10% e 15% de cimento Portland pelo resíduo.

Todavia, foi possível perceber através dos resultados dos seis ensaios realizados que a substituição do cimento Portland pelo resíduo, nesse caso, não foi tão eficiente quanto o esperado. Ao mesmo tempo que os três traços com resíduo não ultrapassaram os resultados obtidos do traço referencial não houveram perdas expressivas no que tange as propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

Para o ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, apenas o traço referência obteve o valor desejado de 25MPa. Aos 56 dias, além do T1, somente o traço 2 com 5% de substituição atingiu a marca da resistência estipulada, já os demais traços (T3 e T4) não atingiram o resultado esperado. Uma das possíveis causas para a redução é a relação a/a utilizada, bem como, a porosidade existente no concreto decorrente da sua hidratação e composição química do resíduo de substituição. Sendo assim, seria de suma importância ser analisada a redução da relação a/a para uma comparação do comportamento dos quatro traços frente aos ensaios realizados e determinar se a resistência a compressão atinge os 25MPa estipulados, pois os resultados obtidos nesse estudo não podem ser considerados concretos estruturais para a classe de agressividade II.

Além disso, para o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, pode-se perceber que, novamente, nenhum dos três traços com substituição atingiram e/ou ultrapassaram o traço referência. Os resultados foram esperados quando feita uma relação com o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova. Já com relação aos índices físicos, os resultados foram contrários aos esperados, pois, à medida que foram diminuindo os valores de propagação de ondas ultrassônicas, os valores de índices físicos deveriam progredir, entretanto ocorreu uma diminuição

O ensaio de resistividade elétrica se mostrou como o esperado, já que quanto maiores as substituições, maiores os resultados obtidos e mais hidratado o concreto se apresentou. Demonstrando-se, assim, a coerência existente entre os ensaios de absorção e índice de vazios.

Os resultados dos índices físicos apresentaram lógica ao decorrer do ensaio. Os maiores resultados foram encontrados no T1 – REF, sendo ele o que mais absorve água e possui maiores índices de vazios e massas específicas reais.

No que diz respeito ao ensaio no estado fresco, os resultados obtidos coincidem com o esperado já que ocorreu uma redução da área superficial do resíduo se comparado ao cimento e um aumento do abatimento por conta da hidratação e quantidade de água presentes no concreto. Quanto a massa específica do cimento e do resíduo, as mesmas se mantiveram semelhantes com valores de 2,76 g/cm³ e 2,63 g/cm³, respectivamente não interferindo significativamente.

Ademais, um ponto importante a ser mencionado é a questão da economia com a utilização dos resíduos. Atualmente o valor médio de um quilograma de cimento é de R\$0,70 centavos e do resíduo, cerca de R\$0,38 centavos em média. Sendo assim, utilizando como exemplo uma obra que utilize, no mínimo, 300 sacos de cimento, com uma substituição de 15% de cimento pelo resíduo a economia seria de R\$ 1.440,00 reais. Desse modo, seria de suma importância verificar se com o a diminuição da relação a/a a resistência tende a aumentar e, conseqüentemente, validar a utilização do resíduo.

REFERÊNCIAS

- ABD ELMONTY, A. E. M. (2013). **Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust**. Construction and Building Materials, 47, 743–752. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05
- ABIROCHAS 2011. **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2010** – Informe 01/2011. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. São Paulo. 14pp. Disponível em http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/9576/Exporta_2010.pdf.
- ABIROCHAS 2011. **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2010** – Informe 01/2011. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. São Paulo. 14pp. Disponível em http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/9576/Exporta_2010.pdf.
- ABIROCHAS. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O setor de rochas ornamentais e de revestimento**. Informe 2017. São Paulo. 2017
- ABIROCHAS. **Balço de Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Agosto 2021**. Disponível em:< https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/09/Informe-06_2021-Exportac%CC%A7o%CC%83es-agosto.pdf>.
- ABIROCHAS. **Guia de aplicações de Rochas em Revestimentos**, 2020. Disponível em:< https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Bula_completa_marco_2021.pdf>. Páginas 37.
- ABIROCHAS. **Guia de aplicações de Rochas em Revestimentos**, 2020. Disponível em:< https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Bula_completa_marco_2021.pdf>. Páginas 20 a 28.
- ABIROCHAS. **Guia de aplicações de Rochas em Revestimentos**, 2020. Disponível em:< https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Bula_completa_marco_2021.pdf>. Páginas 37.
- ABIROCHAS. **O Desempenho Brasileiro no Setor de Rochas Ornamentais**, 2021. Disponível em:< https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/05/Informe-02_2021-Desempenho-do-Setor-v3.pdf> Páginas 2,3 e 4.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655. **Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16889. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, 2020.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16916. **Agregado Miúdo – Determinação da densidade e absorção de água**, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16917. **Agregado Graúdo – Determinação da densidade e absorção de água**, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16972. **Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, 1994.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7185. **Solo – Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego do frasco de areia**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos**, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8802. **Concreto endurecimento – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8953. **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9813. **Solo – Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação**, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**, 2003.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. ABRELPE. Disponível em:. Acesso em: 30 de abril de 2011.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, CORPORAÇÃO FINANCEIRA INTERNACIONAL DO BANCO MUNDIAL, CONSELHO EMPRESARIAL MUNDIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Roadmap Tecnológico de Cimento, 2019**. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf

ALENCAR, C.R.A. et al. **Estudo econômico sobre rochas ornamentais, tecnologias de lavra e beneficiamento**. v.3, Fortaleza, IEL/FIEC, agosto-1996

ALIABO, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Auda, E. M. (2014). **Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete**. Construction and Building Materials, 50, 28–41. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.0

ALLI, OO; Alli, JA; Odewumi, TO; Yussuff, ON **Propriedades de resistência e durabilidade do concreto contendo pó de rocha de pedreira como agregado fino**. Int. J. Sci. Res. IJSR 2016, 7, 418-421

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **O cimento do Futuro, 2019**. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/09/O_Cimento_do_Futuro_ArnaldoBattagin_CShow_20190816.pdf

AZEVEDO G. R. A.; ALEXANDRE J.; XAVIER C. G.; CANDIDO S. V.; MONTEIRO N. S.; VIEIRA F. M. C. **Relevance of Ornamental Stone Residues in the Manufacture of Concrete Blocks for Structural Masonry, 2014**.

BACARJI, E. et al. **Sustainability Perspective of Marble and Granite residues as concrete fillers**. Construction and Building Materials, v. 45, p. 1–10, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 1, São Paulo, SP: IBRACON, 2011. p. 185-232

BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: Orientação para o seu licenciamento e aplicação da resolução **CONAMA 307/2002**. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012**. Disponível em: https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Instituto de Pesquisa Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais, 2012**. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_residuos_solidos_industriais.pdf. Página 13

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos** – 2008. Brasília: MCidades. SNSA, 2010.

CADORE, B. C. **Utilização de resíduo industrial de vidro como substituição de cimento Portland em concretos convencionais**. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. **Informativo Econômico, 29/03/2022**. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/03/informativo-economico-caged-fevereiro-2022.pdf>

CAMPOS, H. F.; MARQUES FILHO, J.; KLEIN, N.S. **Concretos Sustentáveis Otimizados por Modelos de Empacotamento de Partículas: Revisão Bibliográfica**. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 58, 2016, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: Ibracon, 2016, p. 1-13.

CAMPOS, T. Kátia. **Evolução da Geração Per Capita de Resíduos Sólidos em Países Desenvolvidos e Emergentes**, 2013. Disponível em:< <https://www.metro.org.br/heliana/evolucao-da-geracao-per-capita-de-residuos-solidos-em-paises-desenvolvidos-e-emergentes>>

CARANASSIOS A. *Applicazione di tecnologie avanzate per il taglio del granito*. Cagliari, 1993. Tese de Doutorado – Università Degli Studi di Cagliari

CASTRO, A.; FERREIRA, F. **Effect of particle packing in the durability of high performance concretes**. *Ingeniería de Construcción*, v. 31, n. 2, p. 91-104, 2016.

CELIK, T.; Marar, K. **Efeitos do pó de pedra britada em algumas propriedades do concreto**. *Cem. Concr. Res.* 1996, 26, 1121-1130. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00078-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00078-6)

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. **Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete**. *Construction and Build Materials*, v. 25, p. 3768-72, 2011.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETÓN. (1989). **CEB Bull 192: Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report**. Lausanne.

DEGEN K. M.; VIEIRA L. G.; CALMON L. J.; ULIANA G. J.; BASTOS S. R. **Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento**, 2013. Disponível em:< <file:///C:/Users/Brasul/Downloads/concretos-produzidos-com-resc3adduos-proveninetes-do-beneficiamento-de-rochas-ornamentais-como-substituto-parcial-de-cimento.pdf>>.

DOBISZEWSKA, M.; BAGCAL, O.; BEYCIO "YGLU, A.; GOULIAS, D.; KOKSAL, F.; NIEDOSTATKIEWICZ, M.; ÜRÜNVEREN, H. **Influence of Rock Dust Additives as Fine Aggregate Replacement on Properties of Cement Composites – A Review**. *Materials* 2022, 15(8), 2947: <https://doi.org/10.3390/ma15082947>

EPA - Environmental Protection Agency. **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/ozone-pollution/2014-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-ozone>. Acesso em: 04 nov. 2017.

ERGÜN, Ali (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810003697>

GESOĞLU, Mehmet. et al. **Fresh and Hardened Characteristics of Self Compacting Concretes Made with Combined use of Marble Powder, Limestone Filler, and Fly Ash**. Construction and Building Materials, v. 37, p. 160–170, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W.A. (2002), “**Reciclagem do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil**”, SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. 2002, Recife, PE. Anais... Recife, PE, pp.179-189.

GOU M.; ZHOU L.; WEI YING THEN N. **Utilization of Tailings in Cement and concrete: A Review**, 2019. Página 450.

HELENE, Paulo. **Contribuição ao Estudo de Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 248 f. Tese (Livre Docência) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HX QUIAO, et al., **A viabilidade do pó de rocha basáltica e areia superfina como materiais de substituição parcial para cimento Portland e areia artificial em argamassa de cimento**. Res Appl Mat Sci, 2019,1(1): 1-9. <https://doi.org/10.33142/msra.v1i1.665>

IBRACON. SATO Y. V.; GALINA L. P. A.; TEIXEIRA L. S. E. J. **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**, 2018.

IBRACON. TEIXEIRA R. F.; MAGALHÃES C. F.; WALLY B. G.; SELL JUNIOR K. F.; PALIGA M. C.; TORRES S. A. **Uso do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial ao aglomerante de produção de concretos estruturais**, 2020.

IEA AND WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009: **Carbon Emissions Reductions up to 2050**, OECD/IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf.

ILANGOVARA, R.; MAHENDRANA, N.; NAGAMANIB, K. **Propriedades de resistência e durabilidade do concreto contendo pó de rocha de pedra como agregado fino**. ARPN J. Eng. Aplic. Sci. 2008, 3, 20-26.

IPCC. Climate Change 2007: The PHysical Science Basis. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. Paris: Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report, 2007

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: **WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**, 1996, São Paulo. Anais...São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996.

JOHN, V. M., 2000, **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência), Escola Politécnica/ USP, São Paulo, SP, Brasil.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: **RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES**, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>.

KARPINSK, A. L. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. EDIPUCRS, Porto Alegre: 2009

KARPINSK, A. L. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. EDIPUCRS, Porto Alegre: 2009

KUMAR, V., SIGLA, S., & GARG, R. (2020). **Strength and microstructure correlation of binary cement blends in presence of waste marble powder**. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.073

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARQUES NETO, José da Costa. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição no Brasil**. São Carlos: Rima, 2005. 162 p.

MARQUES, A.; MARÇAL, R. F. M.; NETO, A. A. B.; PILATTI, L. A. Os principais equipamentos utilizados nas empresas de beneficiamento de mármore e granito, suas funções e importância no processo. 2006.

MEDEIROS – JUNIOR, R. A., LIMA, M. G. **Variação da resistividade elétrica do concreto com formato de corpos de prova para diferentes tipos de cimento**. Revista de Engenharia e Tecnologia. 2014. v. 7, n. 1

MEDEIROS - JUNIOR, R. A., MUNHOZ, G. S., MEDEIROS, M. H. F. (2019), **“Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana”**, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 152 – 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335><http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

MEHTA P.K, MONTEIRO P.J.M. **Concrete: Microstructure, properties, and materials**. 3ed. 684p. 2008.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Nicole Pagan Hasparyk. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Nicole Pagan Hasparyk. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; LISB, C. G. (2005), "**Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais**", Rio de Janeiro: Anuário do Instituto de Geociência. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Vol. 28-2, p. 139-151.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**, 2016. Página 2

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**, 2016. Página 2. MILLER, Norman. **Extracting materials is wreaking havoc on the planet. Could the world's growing mounds of waste hold the key to sustainable construction?** 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20211215-the-buildings-made-from-rubbish>

NUNES, R. L. S.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo, 2002, p. 1-13.

PACHECO, Fernanda. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. 2015. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, 2015.

PARAGUASSÚ, A. B.; RIBEIRO, R. P.; SILVEIRA, L. L. L.; RODRIGUES, J. E., **Aplicação de Bases Conceituais de Tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais**. Revista Minerva, São Carlos/SP, v. 1, p. 45-50, 2005.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Revista Concreto e Construções. IBRACON, n. 53, p. 14-19, 2009.

PEDROSO, Fábio Luís. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Revista Concreto e Construções. IBRACON, n. 53, p. 14-19, 2009.

PIMENTEL, L. L.; LINTZ, C. C. R.; SACRAMENTO, W.; ARAUJO, R., 2007, "**Utilização de resíduos da construção para a produção de argamassa de revestimentos**". In: 49º Congresso Brasileiro de Concreto IBSN 97885, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul.

QIU H.; ZHANG F.; LIU L.; HOU D.; TU B. **Influencing Factors on Strength of Waste Rock Tailing Cement Backfill**, 2020. Páginas 1 e 3.

RAMOS, T., MATOS, A. M., SCHMIDT, B., RIO, J., & SOUSA - COUTINHO, J. (2013). **Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and**

durability. Construction and Building Materials, 47, 1001–1009. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05

RASHWAN, M. A., AI BASIONY, T. M., MASHALY, A. O., & Khalil, M. M. (2020). **Behaviour of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement.** Journal of Building Engineering, 101697. doi:10.1016/j.jobbe.2020.101697

SATO, Y. V., GALINA, L. P. A., TEIXEIRA, L. S. E. J. **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** 2018. v. 11, n. 6, p. 1284 – 1307.

SCHALCH, V., CORDOBA, R.E. **Estratégia para gestão de resíduos sólidos.** 2009. Material didático elaborado para a disciplina de Gestão Ambiental (CD-ROM). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

SHEN, W.; CAO, L.; LI, Q.; ZHANG, W.; WANG, G. **Quantifying CO2 emissions from China's cement industry.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 1004- 1012, 2015

SILVEIRA, L.L.L; VIDAL H.W.F; SOUZA, C.J (2014). **Beneficiamento de Rochas Ornamentais,** Rio de Janeiro. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1736/1/CCL00050014_CAPITULO_07_opt.pdf página 339.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **CONSUMO APARENTE DE CIMENTO POR REGIÕES E ESTADOS (t) 2020.** Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1631633740.pdf>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **CONSUMO APARENTE DE CIMENTO POR REGIÕES E ESTADOS (t) 2020.** Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1645017808.pdf>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Processo produtivo.** Disponível em: <http://snic.org.br/processo-de-producao.php>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **SNIC 50 anos. A Indústria do Cimento no Brasil - Aspectos de seus Custos e Desenvolvimento – Consultec 1967.** Disponível em: http://snic.org.br/assets/doc/historia_do_cimento_no_brasil.pdf

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Sustentabilidade. Indicadores.** Disponível em: <http://snic.org.br/sustentabilidade-indicadores.php>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (Rio de Janeiro). **Relatório Anual 2015.** Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2015.pdf Acesso em: 10 mar. 2018

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Indicadores.** Disponível em:

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **SNIC 50 Anos**. Rio de Janeiro 2006b Acesso em www.snic.org.br, 15/06/ 2006

TEIXEIRA, R. F., MAGALHÃES, C. F., WALLY, B. G., SELL JUNIOR, K. F., PALIGA, M. C., TORRES, S. A. **Uso de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial ao aglomerante na produção de concretos estruturais**. 2020. v. 13, n. 3, p. 501 – 514.

TUTIKIAN, F.B., ISAIA, C. G., HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. 2011. Página 6. Capítulo 36.

VAZZOLER, J.S (2015). **Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia**. Disponível em:
https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/9467/1/tese_10446_Jana%C3%ADna%20dos%20Santos%20Vazzoler.pdf

VIDAL, F.W.H.; PINHEIRO, J.R.; CASTRO, F.N.; CARANASSOIS, A. (2014). **Lavra de rochas ornamentais**, Rio de Janeiro. Disponível em:
http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1733/1/CCL00020014_CAPITULO_04_opt.pdf

WOELF, G. A.: LAUER, K. **The electrical resistivity of concrete with emphasis on the use of electrical resistance for measuring moisture content**. Cement, concrete and Aggregates, v. 1, n. 2, 1979.